Physics

JAN 9 - 1947

Akustische Zeitschrift

Im Auftrage der

DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT

unter Mitwirkung der

DEUTSCHEN REICHSPOST und PHYSIKAL.-TECHN. REICHSANSTALT

herausgegeben von

MARTIN GRÜTZMACHER und ERWIN MEYER

1. Georg v. Békésy: Über die Elastizität der Schneckentrennwand des Ohres 265
2. Emil Löb: Über die subjektive Wirkung von Klangfarbenänderungen 279
3. Oskar Vierling und Fritz Sennheiser: Zur Frage der Beeinflussung des Toneinsatzes bei der Orgel 294
4. H. J. v. Braunmühl und O. Schubert: Ein neuer elektrischer Stimmtongeber für 440 Hz 299
5. Schrifttum 303

Fünftes Heft Sechster Jahrgang September 1941

Verlag von S. Hirzel in Leipzig

Akustische Zeitschrift

Die Zeitschrift erscheint in 6 Heften je Jahrgang. Der Bezugspreis beträgt 10.— RM. je Jahrgang. Von den Originalbeiträgen und zusammenfassenden Berichten stehen den Verfassern 30 Sonderdrucke unberechnet zur Verfügung. Weitere Exemplare werden berechnet und müssen bei Rückgabe der Fahnenkorrekturen bestellt werden

Schriftleitung:

Dr. Martin Grützmacher, Oberregierungsrat und Mitglied der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin NW. 87, Franklinstr. 22

Professor Dr. Erwin Meyer, Institut für Schwingungsforschung an der Technischen Hochschule, Berlin NW. 87, Franklinstr. 1

*

Beiträge, sowie alle die Schriftleitung betreffenden Zuschriften werden erbeten an: Dr. Martin Grützmacher, Berlin NW. 87, Franklinstr. 22

WECO-DÄMMSTOFFE-DRP.

gegen **Schall jeder Art und Stärke** (z. T. auch Wärme) entsprechen den bisherigen Forschungsergebnissen, der neuzeitlichen Technik und den Forderungen der Praxis und Erfahrung und besitzen höchsten Dämmwert, gleichbleibende Dauerwirkung, größte Wirtschaftlichkeit, geringste Baustärke, beste Belastungsfähigkeit und weitgehende Immunität gegenüber allen normalen Einflüssen der Praxis.

Tausendfach bewährte WECO-Schalldämmungen auf Grund **25jähriger Erfahrungen** im In- und Ausland, **zahllose Referenzen** von staatlichen, städtischen, industriellen und sonstigen Bauten und Betrieben über von uns ausgeführte Schall-Dämmungen bei Fußböden, Wänden, Auflagern, Maschinen, Fundamenten usw.

WEISS & CO, LEIPZIG C1 / Weco-Schalldämmungen-DRP.

AKUSTISCHE ZEITSCHRIFT

Fünftes Heft Sechster Jahrgang September 1941

Über die Elastizität der Schneckentrennwand des Ohres

Von Georg v. Békésy

(Mit 16 Textabbildungen)

1. Einleitung

Die Schnecke besteht, wie die Abb. 1 zeigt, aus einer mehr oder weniger kreisförmigen Röhre, die in den harten Knochen des Felsenbeines eingelagert ist. Die Röhre ist in ihrer ganzen Länge durch eine Wand in zwei Teile geteilt, die in der Nähe der Schneckenachse knöchern ist, um dann weiter nach außen elastischer zu werden und schließlich in der Basilarmembran zu endigen. Auf ihr sitzt das sog. Cortische Organ, in dem die in der Mitte der Schneckenachse eintretenden Hörnerven endigen. Der gesamte nervöse Endapparat befindet sich in einer dreieckförmigen Erweiterung der Trennwand, dem Ductus chochlearis, dessen der Basilarmembran gegenüberliegende Seite von einer dünnen Membran, der Reissnerschen Membran, geschützt wird. Am äußeren Rande der Schnecke werden sowohl die Basilarmembran wie die Reissnersche Membran von dem faserigen Gewebe des Ligamentum spiralis festgehalten.

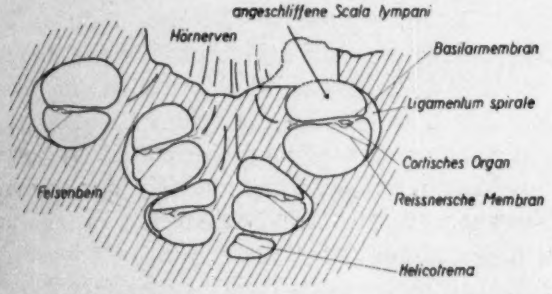

Abb. 1. Präparation der Schnecke zur Untersuchung der Spannungsverhältnisse der Basilarmembran

Alle drei Kanäle sind mit Flüssigkeit gefüllt. Die Schwingungen der Steigbügelfußplatte werden auf die der Schneckenspitze zugewandten Röhrenhälfte übertragen, setzen über die Reissnersche Membran die Basilarmembran mit den Nervenendigungen in Bewegung und gleichen sich durch die zweite Röhrenhälfte und das sie abschließende, mit dem Hohlraum des Mittelohres in Verbindung stehende, runde Schneckenfenster wiederum aus. An der obersten Spitze des Schneckenkanales, fehlt die Trennwand, so daß über diese Öffnung, Helicotrema genannt, sich eine statische Druckdifferenz auf beiden Seiten der Basilarmembran ausgleichen kann.

Die Gehörschnecke des Menschen und der Säugetiere wurde 1561 entdeckt[1]). Die Resonanzerscheinungen (Mittönen) zweier aufeinander abgestimmter Saiten wurden in der Mitte des 17. Jahrhunderts an den Vorläufern des heutigen Klaviers zuerst beschrieben, obwohl sie wahrscheinlich schon im Altertum bei den Harfen beobachtet werden konnten. Als Grundlage der Schallwahrnehmung wurde die Resonanz zuerst von Du Verney 1683 verwertet. Damals wurde der knöcherne Teil der Schnekkentrennwand als Resonator aufgefaßt. Da die Breite dieser knöchernen Spirale der Schneckenspitze zu immer kleiner wird, so wurde angenommen, daß die hohen Schwingungen in der Schneckenspitze Mitschwingen erzielen.

Es setzen jedoch die Druckschwankungen im Schneckenkanal die weicheren Teile der Trennwand in größere Schwingungsamplituden als den knöchernen Teil, so daß es logischer erscheint, die Schallwahrnehmungen

[1]) Weitere Literaturangaben bei H. Held, Bethe-Bergmann, Bd. XI, Receptionsorgane I, (1926), S. 467; K. L. Schäfer und M. Giesswein, Denker-Kahler, Hdb. Hals- usw. Hk., Bd. 6, Gehörorgan I, (1926), S. 462.

auf diesen Teil der Trennwand zu verlegen. CONTUGNO hat 1760 zuerst hierauf hingewiesen. Da die Breite des weicheren Teiles der Schneckentrennwand nach der Schneckenspitze zu immer größer wird, so folgt daraus, daß nun die tieferen Töne in der Schneckenspitze lokalisiert werden, was sich in letzter Zeit experimentell bestätigen ließ. V. HENSEN vertrat 1863 die Ansicht, daß unter den membranösen Gebilden der Trennwand die Basilarmembran der stärkst gespannte Teil sei, so daß in ihr die Resonanz auftreten muß.

Da es jedoch schwer ist, sich vorzustellen, daß in einer Membran scharf lokalisierte Klavierseiten ähnliche Schwingungen auftreten, so wurde von H. v. HELMHOLTZ untersucht, unter welchen Bedingungen dies möglich ist. Die Berechnungen zeigten[2]), daß, falls bei einer länglichen Membran die Querspannung bedeutend größer ist als die Längsspannung bei einer gleichförmigen Druckerregung der ganzen Membran, tatsächlich nur eng begrenzte Querstreifen in seitenförmige Schwingungen geraten. Da die grundlegende Entdeckung von G. S. OHM und H. v. HELMHOLTZ[3]), wonach eine Klangempfindung in einzelne Töne zerlegt wird und von den Phasenverhältnissen der einzelnen Töne unabhängig ist, sich nur durch die Resonanzerscheinungen erklären ließ, so schien diese Anschauung über die Schwingungsverhältnisse in der Schnecke gesichert, so daß in den weiteren hörtheoretischen Arbeiten bis zu den Untersuchungen von O. F. RANKE[4]) die Längsspannung der Basilarmembran durchweg vernachläßigt wurde.

2. Über die Spannungsverhältnisse der Schneckentrennwand

Da die einfache Vorstellung einer klavierseitenähnlichen Resonanz in der Basilarmembran an eine vernachlässigbar kleine Längsspannung der Basilarmembran gebunden ist, so läßt sich durch Bestimmung des Verhältnisses zwischen Längs- und Querspannung ermitteln, ob diese einfache Vorstellung der Resonanzart im Ohr zulässig ist, oder ob sich alles bedeutend verwickelter abspielt.

Das Verhältnis zwischen Längs- und Querspannung läßt sich sehr leicht bestimmen. Denn spannt man z. B. eine Gummimembran ganz gleichmäßig aus und drückt senkrecht zur Oberfläche eine Nadel in die Membran, so entsteht eine nach allen Richtungen gleichmäßige kreisförmige Einbuchtung. Wird die Membran nach der einen Richtung mehr gespannt, so wird die Einbuchtung elliptisch. Auf diese Weise lassen sich nicht nur bei Membranen, sondern auch bei anderen elastischen Stoffen Richtungsungleichmäßigkeiten leicht erkennen.

Um diesen Versuch auf der Basilarmembran auszuführen, wurde wie die Abb. 1 zeigt, die Skala tympani vorsichtig angeschliffen, so daß die Schneckentrennwand sichtbar wurde. Der knöcherne Teil ist bei Auflicht weiß und sehr gut sichtbar. Darauf folgt eine elastische Zone, welche grau erscheint und gut sichtbare radiäre Fasern aufweist. Die Basilarmembran selbst wird meist nur durch den daraufliegenden vom Schleifen herkommenden feinen Knochenstaub sichtbar.

Um die Basilarmembran beim Berühren mit einer Nadel durch eine ungewollte Bewegung nicht zu zerreißen, stellt man sich 0,01—0,1 mm dünne Glasfäden her, deren Länge so eingestellt wird, daß beim Drücken auf eine Waage bei etwa 40 bez. 200 mg die Knickfestigkeit des Fadens erreicht wird, so daß auch beim stärkeren Draufdrücken kein größerer Druck entstehen kann. Das freie Ende des Glasfadens schmilzt man zweckmäßig zu einer ganz kleinen Kugel zusammen, damit der Druck gleichmäßig verteilt wird. Anstatt Glasfäden sind bei Vorversuchen auch Kopfhaare gut, da ihre Knickfestigkeit durch Abschneiden leicht eingestellt werden kann. Man wählt sie etwa 7 bis 40 mm lang und klebt sie auf einen möglichst leichten Griff.

Die Beobachtungen zeigten, daß in der Nähe der Schneckenspitze, wo die Basilarmembran

[2]) H. v. HELMHOLTZ, Die Lehre von den Tonempfindungen, 6. Aufl. (1913), S. 639.

[3]) G. S. OHM, Pogg. Ann. Phys. u. Chem. 135 (1843), S. 513; 138 (1844), S. 1. H. v. HELMHOLTZ, Tonempfindungen.

[4]) O. F. RANKE, Die Gleichrichter-Resonanztheorie, Lehmanns Verlag, München 1931.

breit ist, die Eindrucksfläche vollkommen kreisförmig ist, auch wenn man die Basilarmembran nicht genau in der Mitte eindrückt. In der Nähe des Steigbügels wird die Eindruckfläche meist länglich in Richtung der Längsachse, wobei das Achsenverhältnis maximal 1:2 betrug. Es sind hierbei ganz dünne Glasfäden zu verwenden, damit die Druckfläche klein gegenüber der Membranbreite bleibt. Die mikroskopische Vergrößerung wählt man etwa 30fach. Daraus folgt jedenfalls, daß die Schneckentrennwand an ihrem am leichtesten beweglichen Teil in der Längs- und Querrichtung im wesentlichen die gleichen elastischen Eigenschaften aufweist. Die Richtungsunabhängigkeit der elastischen Eigenschaften beruht z. T. auch darauf, daß neben den bekannten radiären Fasern der Basilarmembran auch noch jene Schicht zu berücksichtigen ist, die auf der Basilarmembran aufliegt (tympanale Belegschicht) und in der Längsrichtung der Menbran verlaufende Fasern zeigt. Diese zueinander senkrechten Faserzüge kommen wie W. Roux[5]) gezeigt hat, in der Natur sehr oft vor, z. B. auch beim Trommelfell.

Bewegt man mit dem Tasthaar nicht die Basilarmembran, sondern die der Schneckenachse näherliegende, bei Auflicht grau erscheinende Schicht, so wird dabei immer eine beträchtliche Länge, bis zu einer $^1/_8$ Windung, mitbewegt. Gleichzeitig wird auch die Basilarmembran auf dieser großen Länge durchbogen. Diese Schicht besitzt daher eine große Steifigkeit in der Längsrichtung.

Drückt man einen Stift in eine gleichmäßig gespannte Membran, so entsteht eine Eindrucksfläche, wie sie von unten gesehen die Abb. 2 oben darstellt. In der Nähe der Druckkraft nimmt die Ausbuchtung sehr rasch zu. Bei der Basilarmembran ließ sich etwas ähnliches nicht beobachten. Die Eindruckfläche ist etwa die gleiche wie beim Eindrücken der Bleistiftspitze in die Hautoberfläche.

Daraus folgt, daß die Basilarmembran keine gespannte Membran darstellt, denn bei der Deformation entsteht ein wesentlicher Teil ihrer elastischen Kräfte auf andere Weise. Es fragt sich daher, ob überhaupt die ruhende Basilarmembran eine Spannung aufweist.

Die Ansicht, daß die Querfasern der Basilarmembran ganz besonders gut entwickelt sind, läßt sich nicht bestätigen. Denn zerzupft man unter dem Mikroskop die Basilarmembran, so erweist sie sich als locker im Verhältnis etwa zu den Fasern des in die Schneckenachse eindrin-

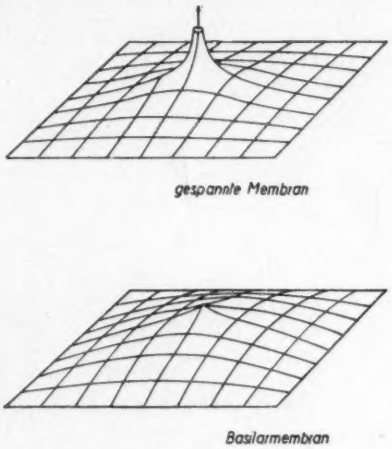

Abb. 2. Eindruckflächen einer gleichförmig gespannten Membran und der Basilarmembran in der Nähe der Schneckenspitze

genden Hörnerven, während sich z. B. die Faserhaut, die auf der Gehirnseite des Felsenbeines liegt, kaum zerreißen läßt. Eine große Spannung der Basilarmembran ist auch schon deshalb unwahrscheinlich, da es sich bei den Präparationen immer wieder zeigte, daß beim Anschleifen des Schneckenkanals zunächst eine ganz dünne Glashaut sichtbar wird, die mit dem Ligamentum spirale fest verbunden ist. Diese Glashaut und das Ligamentum spirale lassen sich nun leicht von der Knochenwand loslösen, derart, daß ein großer Teil des Schnekkenkanales vollkommen durchsichtig von der Glashaut getragen wird.

Weiter zeigen alle elastischen im gespannten Zustand sich befindlichen Stoffe und Gewebe beim Anschneiden der Oberfläche ein linsenförmiges Auseinanderklaffen der Schnittflächen. Bei den in Quer- und Längsrichtung ausgeführten sehr feinen Schnitten auf der Basilarmembran konnte ein gegenseitiges Abheben der

[5]) W. Roux, Ges. Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen, 1895.

Schnittflächen voneinander nicht beobachtet werden.

Diese Beobachtungen sprechen dafür, daß die Basilarmembran nicht gespannt ist und am besten mit einer gallertartigen Platte verglichen werden kann, auf der eine dünne homogene Faserschicht liegt. Die vollkommene Spannungsfreiheit der Schnecke erscheint physiologisch sehr wichtig zu sein, denn dadurch wird der innere Aufbau der Schnecke ganz gleichartig mit den übrigen Teilen des Labyrinthes, wo von Anfang an, wenn kein Reiz einwirkt, die Gewebe als spannungsfrei betrachtet wurden.

In diesem Zusammenhang verdienen auch die Erscheinungen ein Interesse, welche dafür sprechen, daß in der Schnecke neben den tonfrequenten Druckschwankungen auch langsame Deformationen beim Hören eine Rolle spielen[6]). Denn würde eine kräftige Spannung in der Membran bereits vorhanden sein, so würde ihre geringste Änderung bereits eine Störung erzeugen, während in der spannungsfreien Schnecke Gleichspannungen und Dauerdeformationen nur durch den Schall erzeugt werden.

Wäre die Hörphysiologie nicht von dem Bild der schwingenden Klaviersaite ausgegangen, so wäre wohl die Basilarmembran nicht in einen dauernden Spannungszustand versetzt worden. Denn physikalisch kommt es bei den Flüssigkeitsverschiebungen in der Schnecke lediglich darauf an, daß bei gegebenen Druckschwankungen in der einen Schneckenhälfte eine gewisse Flüssigkeitsmenge pro mm Länge der Basilarmembran in die andere Schneckenhälfte gepreßt wird, was lediglich von der Steifigkeit der Zwischenwand abhängt. Die nötige Steifigkeit kann nun nicht nur durch Spannen der elastischen Schicht erreicht werden, sondern durch Vergrößern der Schichtdicke. Außerdem läßt sich die Ausbuchtung A einer elastischen Platte durch die Breite b der Platte sehr stark verändern, denn ist p der auf der Platte gleichmäßig wirkende Flüssigkeitsdruck, h die Dicke der länglichen Platte und E der Elastizitätsmodul, so ist[7])

$$A = 0{,}028 \cdot \frac{p\, b^4}{E\, h^3}, \tag{1}$$

so daß die von der Schneckenspitze bis zum Steigbügel auftretenden Breitenänderungen der Basilarmembran genügt hätten, um die für die Frequenzanalyse notwendige örtliche Änderung der Membransteifigkeit zu erreichen.

3. Über die Präparationstechnik der menschlichen Schnecke

Die Versuche über die Spannungsverhältnisse in der Basilarmembran sind trotz ihrer Einfachheit verhältnismäßig schwer auszuführen, denn die saubere Präparation der Schnecke bildet große Schwierigkeiten. Es ist nämlich geradezu auffallend, daß trotz der hoch entwickelten Sektionstechnik der gerichtlichen Medizin eine Sektionstechnik für kleinere Organe, wie z. B. das Mittelohr gar nicht vorhanden ist. Z. T. kommt dies davon, daß mit gewöhnlichen Einrichtungen die direkte anatomische Untersuchung derart kleiner Teile nicht mehr möglich ist. Es hat sich daher ganz allgemein eingebürgert, derartige kleine Organe nur histologisch zu untersuchen, indem mikroskopische Serienschnitte hergestellt werden. Dieser Zustand hat einen großen Nachteil für die Entwicklung der Hörphysiologie und Pathologie des Gehörorganes, denn die unmittelbare Beobachtung des frischen Organes weist auf viele Erscheinungen hin, die bei den meist Monate dauernden histologischen Vorbereitungen verlorengehen.

Es wurde daher versucht, Hilfsgeräte zu entwickeln, die auch bei den kleinen Abmessungen der Schnecke eine sichere und rasche Präparation erlauben, so daß als Zwischenstufe zwischen der normalen Sektionstechnik und der Histologie noch eine Art Mikroanatomie möglich wird.

Um am Schneckenkanal Präparationen vornehmen zu können, benötigt man eine 30—70-fache Vergrößerung. Dem entspricht bei einem stereoskopischen Binokularmikroskop mit großem Sehfeld, ein Gesichtsfeld von 6—3 mm Durchmesser. Der ganze Erfolg der Präparation hängt davon ab, mit welcher Geschwindig-

[6]) Z. Phys. 29 (1928), S. 793.

[7]) HÜTTE, Bd. I, 26. Aufl. (1931), S. 674.

keit und Sicherheit verschiedene Instrumente in dieses Sehfeld gebracht werden können. Denn ein einziger Fehlgriff kann die ganze getane Arbeit vernichten.

Die Versuche zeigten, daß durch Normalisieren sämtlicher Instrumenthandgriffe und Festlegen einiger Stützpunkte für die Finger und den Arm erreicht werden kann, daß die Spitze der Instrumente ohne Hinsehen nach kurzer Zeit auf 1 mm genau immer an die gleiche Raumstelle gebracht wird. Um die Instrumente immer in der genau gleichen Handstellung zu erfassen, wurde diesen eine 3kantige Form gegeben und wie die Abb. 3 für den zahnärztlichen Bohrer zeigt, auf der einen Seite mit einer Nase versehen, auf der der Zeigefinger zu liegen kommt. Ist der Fingernagel genügend lang, so wird dadurch der Abstand zwischen Instrumentspitze und Zeigefinger ein für allemal festgelegt. Sämtlichen Instrumenten, Bohrer, Nadel, Tasthaar, Messer, Pinsel usw., wurde der gleiche Handgriff gegeben, wobei die auswechselbaren äußeren Hülsen des abgebildeten zahnärztlichen Bohrers verwendet werden können oder aber gleiche Griffe meist aus Siegellack oder einem anderen leichten Stoff um das Instrument gegossen wurden.

Um auch die Hand im Raume festzulegen, bringt man bei eingestelltem Mikroskop die Instrumentenspitze an die gewünschte Stelle des Sehfeldes und unterstützt hierauf die Arme mit den in der Abb. 4 dargestellten und durch Gelenke verstellbaren Armbrett. Am oberen Ende dieser Armstützen befindet sich ein Metallzylinder von etwa 2 cm Durchmesser, der so verstellt wird, daß er mit dem kleinen Finger bequem umfaßt wird, wodurch auch das Handgelenk räumlich fixiert ist. Außerdem dient noch ein kleiner Arm am unteren Ende des Brettes dazu, die Lage des Ellbogens festzulegen. Es zeigte sich, daß es unzweckmäßig ist, mehr Stützpunkte zu verwenden, da bei einer übermäßigen Festlegung des Armes die Muskeln rasch ermüden.

Um bei der Präparation beide Hände frei verwenden zu können, wurde die Scharfeinstellung des Mikroskopes mit dem Fuß vorgenommen. Zu diesem Zweck wurde das Mikroskopstativ mit einem in der Abb. 4 sichtbaren zweiten Zahntrieb versehen, dessen Handtrieb in eine mit Leder ausgefütterte Kapsel gesteckt werden konnte, die ihrerseits mit einem Zahnrad gekoppelt war, das über eine Zahnstange

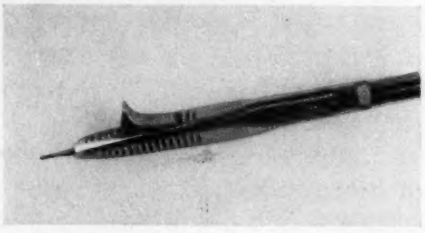

Abb. 3. Normalisierter Handgriff, bei dem das Instrument bis auf einige 0,1 mm immer in der gleichen Stellung in der Hand liegt

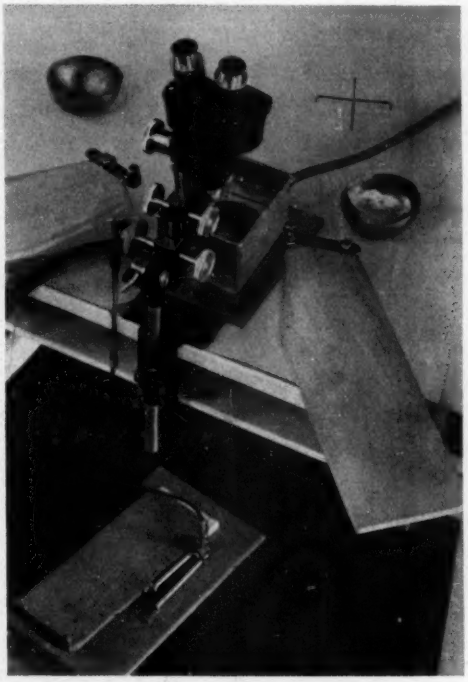

Abb. 4. Mikroanatomischer Präparationstisch

und einem in der Autoindustrie verwendeten biegsamen Kabel mit einem Trittbrett verbunden war, so daß die Zahnstange von hier aus bewegt werden konnte. Eine in einer Röhre angebrachte Feder sorgte dafür, daß das Gewicht des Mikroskopes ausgeglichen wurde und bei den Bewegungen nicht störte. Eine auf diese Weise erhaltene Mikroskopverschiebung von

etwa 3 mm bewährt sich sehr gut. Mit der Zeit wird die Fußbewegung, etwa so wie die Akkomodation der Augen, ganz unwillkürlich.

Als Beispiel soll die in der Abb. 1 dargestellte Präparation der Schnecke beschrieben werden. Um die Lage der Schnecke im Felsenbein festzulegen, geht man am besten von der Gehirnseite des Felsenbeines aus und verfolgt den Verlauf des Hörnerven. Dazu erweitert man zweckmäßig mit dem Bohrer den Porus acusticus soweit, bis die Hörnerven in der Schneckenachse deutlich sichtbar werden. Aus ihrer Richtung läßt sich die Achse der Schnecke bestimmen. Senkrecht zu dieser Achse durchsägt man das Felsenbein mit einer Laubsäge, wie der vertikale Schnitt in der Abb. 5 zeigt. Ein zweiter

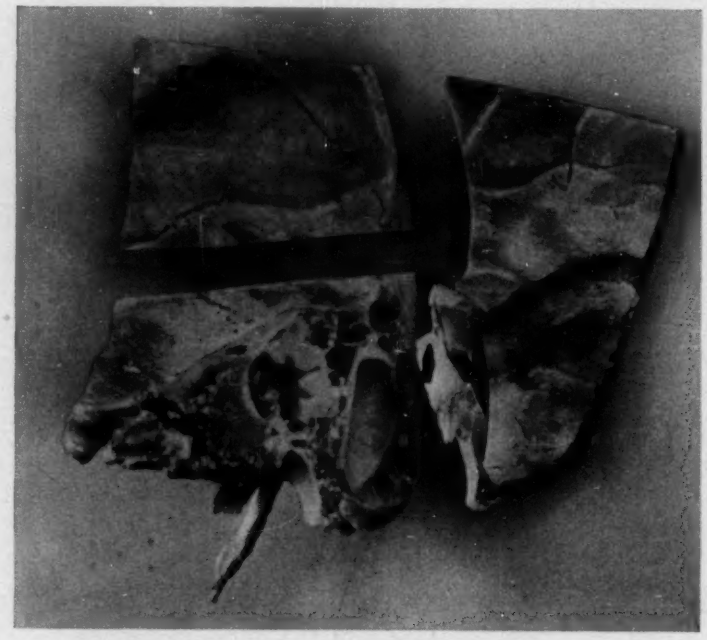

Abb. 5. Grobe Zerlegung des Felsenbeines für die Untersuchung der Schnecke

horizontaler Schnitt entfernt den überflüssigen Teil der Schädelkapsel.

Hierauf wird der Knochenteil mit der Schnecke in eine genau halbkugelförmige eiserne Schale von etwa 9 cm Durchmesser so eingegipst, daß die Mitte der Schnecke mit dem Zentrum der Halbkugel zusammenfällt. Zur leichteren Einstellung dient das in der Abb. 4 sichtbare Drahtkreuz, das auf die Halbkugel aufgesetzt wird. Dem Gips mischt man die gleiche Menge Kieselgur hinzu, damit er später leichter entfernt werden kann und deckt damit den ganzen Knochen bis auf die nächste Umgebung der Schnecke zu. Die Halbkugel wird in ein Gefäß gelegt, an dessen Boden sich eine genau kreisförmige Öffnung von 7 cm Durchmesser befindet, wie es die Abb. 4 zeigt. In dieser kreisförmigen Öffnung läßt sich nun die Halbkugel mit dem Felsenbein in jede gewünschte Lage unter dem Mikroskop verdrehen. Um parallele Verschiebungen leicht ausführen zu können, besteht der Boden des Gefäßes aus einer plangeschliffenen Eisenplatte, die auf einer zweiten feststehenden Eisenplatte verschiebbar ist. Versieht man die beiden geschliffenen Eisenplatten mit einem entsprechenden viskosen Fett, so lassen sich je nach der Einwirkdauer eines konstanten Druckes kleinere oder größere Verschiebungen leicht herstellen.

Um ein Zerreißen der feinen Schneckenmembranen durch kapillare Kräfte zu vermeiden, soll die Schnecke unter Wasser präpariert werden. Man verwendet eine physiologische Kochsalzlösung, die man durch das Gefäß in der Abb. 4 dauernd durchströmen läßt. Die Strömungsgeschwindigkeit wählt man so, daß der beim Bohren entstehende Knochenstaub möglichst mitgeführt wird, ohne daß Wasserwellen an der Flüssigkeitsoberfläche die Beobachtung durch das Mikroskop stören.

Das Bohren und Schleifen des Knochens unter Wasser geht sehr gut, besonders wenn man dafür sorgt, daß der entstehende Knochenstaub im Wasser noch schwebt. Er entfernt sich dann wolkenartig mit der strömenden Flüssigkeit aus dem Gesichtsfeld. Damit der Knochenstaub genügend klein wird, verwendet man Fräser (sog. Finierer der Zahnärzte) mit ganz enger Zahnung bei möglichst großer Umdrehungsgeschwindigkeit, bis zu 8000 Umdrehungen pro Minute, beson-

ders wenn der Knochen weich ist. Am besten bewähren sich in dieser Beziehung die ganz kleinen Schmirgelsteine verschiedener Korngröße, die gegen Ende der Präparationen meist verwendet wurden. Den Schleifdruck muß man dabei so klein wie nur möglich wählen, da das Felsenbein sehr brüchig ist und die Mitte der Schnecke einen schwammförmigen Knochenaufbau besitzt, so daß eine geringe Exzentrizität des Schleifsteins leicht zum Bruch führt.

Die größte Schwierigkeit beim Eröffnen des Schneckenkanals besteht darin, daß die innere Wandung des Kanals mit einer sehr zähen dünnen Haut ausgekleidet ist, die jedoch ihrerseits nur lose an dem Knochen haftet. Bohrt man daher, wie es am bequemsten ist und wie es die Abb. 6a zeigt, den Kanal tangential an, so lösen sich die Knochensplitter von der Glashaut ab, während sie selbst eingedrückt wird. Dadurch löst sich die Glashaut meist in einer größeren Breite von der Knochenwand, so daß auch das Ligamentum spirale und damit die Basilarmembram ihren Halt an der Knochenwandung verlieren.

Daher wurde die Eröffnung des Knochenkanals so vorgenommen, daß zunächst der ganzen Länge nach die Knochenwand parallel der Basilarmembran bis auf einige 0,1 mm abgeschliffen wurde. Dies gelingt bei einiger Vorsicht leicht, denn bei großer Dicke erscheint der Knochen weiß, während eine dünne Knochenwand grau ist, so daß lediglich durch Beurteilen der Knochenfarben die Wandstärke längs dem gekrümmten Kanal entsprechend verkleinert werden kann, wobei der Kanal als ein dunkler Streifen durchschimmert. Nach dieser Vorbereitung wird wie Abb. 6b zeigt mit einem flachköpfigen Schleifstein die Mitte des Kanales angeschliffen und nun seiner Länge nach aufgeschlitzt. Da die Achse des Schleifsteines auf der vorher abgeschliffenen Knochenfläche aufliegt, so kann dies bei entsprechender Größe des Schleifsteines mit großer Sicherheit ausgeführt werden. Ein großflächiges Abreißen der Glashaut von der Knochenwand tritt dabei kaum ein, da man die Drehrichtung des Schleifsteines so wählt, daß das Schleifen vom Inneren des Kanales nach außen erfolgt, wobei die Glashaut an die Knochenwand gedrückt wird und sich daher von ihr nicht trennt. Bei allen Eröffnungen des Schneckenkanals beginnt man stets in der Nähe der Schneckenachse und schreitet dann allmählich nach dem Rand.

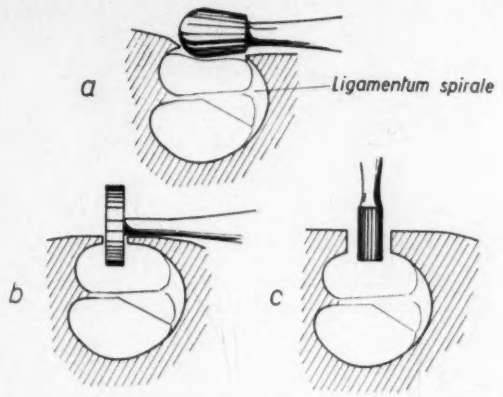

Abb. 6. Verschiedene Arten zur Eröffnung des Schneckenkanales

Auch beim Beginn der Kanaleröffnung nach Abb. 6b stellt man zweckmäßig die Drehachse des Bohrers parallel zur Kanalrichtung und schleift nun mit dem im Sinne des Uhrzeigers sich drehenden radförmigen Bohrer von etwa 0,6 mm Durchmesser auf der Seite des knöchernen Teiles der Trennwand die erste Öffnung. Hat man sich dann genau orientiert, so erfolgt das Aufschleifen in der Längsrichtung. Besonders beim Anschleifen von der Schneckenspitze aus ist dies wichtig, da hier sonst die Reissnersche Membran leicht zerstört wird.

Die Bohrtechnik kann man nur dann als vollkommen bezeichnen, wenn ein Abbröckeln der Knochen nicht auftritt und überall reine Schleifflächen vorhanden sind. Dies erfordert einige Übung.

Ein Loslösen der Glashaut von der Knochenwand wird auch dann vermieden, wenn der Schleifstein Zylinderform besitzt und gemäß der Abb. 6c längs der oberen Hälfte des Schneckenkanals geführt wird. Da dies freihändig nur schwer gelingt, so wurde dazu die in der Abb. 7 dargestellte Einrichtung benutzt.

Sie besteht im wesentlichen aus einer Grundplatte mit einer kreisförmigen Öffnung. Auf dieser Öffnung liegen zwei miteinander verschraubte Ringplatten, die sich parallel zu

sich selbst auf der Grundplatte verschieben lassen. In die Mitte der Ringplatte läßt sich ein zweiter Ring einschrauben, der das Präparat enthält. Am Rande der Grundplatte ist längs einer Achse *A* ein Messingklotz drehbar, dessen

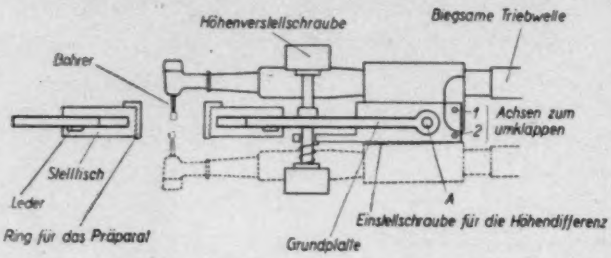

Abb. 7. Schleifeinrichtung zur Eröffnung des Schneckenkanales beiderseits der Basilarmenbran

Neigung zur Grundplatte mittels der Höhenverstellschraube eingestellt wird. Auf dem Messingklotz kommt ein zweiter zu liegen, der den zahnärztlichen Bohrer enthält und mittels zweier durchlöcherter Flügel und einem Drahtstift auf dem Messingklotz befestigt wird. So kann der Bohrer stets aus seiner Normalstellung nach oben geklappt werden, damit die Bohrstelle genau zu übersehen ist. Nimmt man den Drahtstift aus der Bohrung 1 des Messingklotzes heraus und setzt ihn in 2 ein, wobei der Bohrer wie die punktierte Zeichnung zeigt, in einer zur früheren Lage spiegelbildlichen Stellung kommt, so läßt sich das Präparat nun von unten an der genau gleichen Stelle anbohren. Mittels einer kleinen Stellschraube am Messingklotz läßt sich die Höhendifferenz zwischen beiden Bohrstellungen einstellen, so daß sich die übrigbleibende Präparatdicke damit fest legen läßt. Auf diese Weise gelingt es leicht den Schneckenkanal auf beiden Seiten der Basilarmembran zu eröffnen. Die Felsenbeine wurden dabei in die leicht auswechselbaren Ringe für das Präparat (Abb. 7) mit Gips befestigt, und beim Bohren von unten die Grundplatte umgelegt. Da unter Wasser gearbeitet werden mußte, so wurde die ganze Einrichtung schräg in eine Wanne mit Wasser gestellt und so unter das Mikroskop gebracht. Die Abb. 8 zeigt die fotographische Aufnahme der Wanne. Das Grundbrett liegt auf entsprechend ausgebildeten Stützpunkten, so daß es leicht unter Wasser gewendet werden kann. In der hintersten Ecke der Wanne befindet sich das Abflußrohr, das zusammenschiebbar ist und eine genaue Einstellung der Flüssigkeitshöhe erlaubt. In der Glasschale liegt ein Metallring mit einem zweiten eingegipsten Felsenbein. Zur weiteren Präparation können auch die Metallringe mittels eines Zwischenstückes in die Halbkugel der Abb. 4 eingeschraubt werden.

Hat man an irgendeiner Stelle der Basilarmembran eine Messung ausgeführt, so ist es noch eine besondere Aufgabe, den Meßort auf der stark gewundenen Schnecke genau festzulegen. Zu diesem Zweck wurde eine größere Zahl von Schnecken an der Spitze eröffnet und die Mitte des nachgiebigsten Teiles der Membran an den verschiedenen Stellen des Schnek-

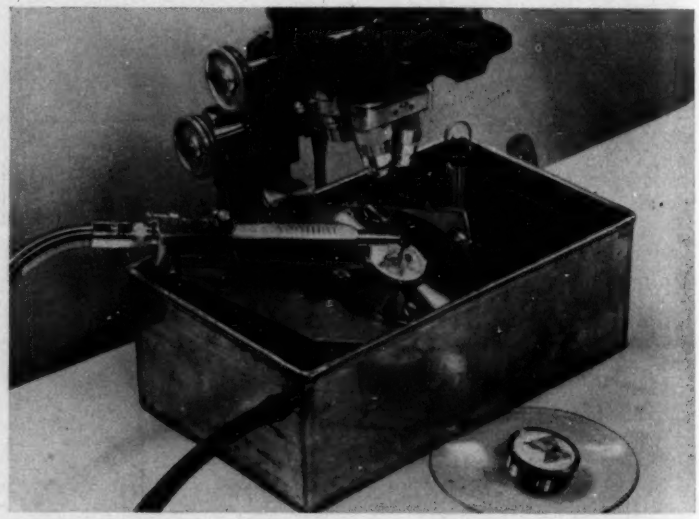

Abb. 8. Schleifeinrichtung zur Eröffnung des Schneckenkanales beiderseits der Basilarmenbran

kenkanals mit einem Zeichenokular abgezeichnet. Durch allmähliches Abtragen der ganzen Schnecke konnte so die Projektion der Membranmitte auf eine zur Schneckenachse vertikale Ebene festgelegt werden. In der

Abb. 9 ist die durch Mittelbildung erhaltene Kurve dargestellt, gleichzeitig mit dem äußeren Rand des Steigbügels und der durch einen Kreis bezeichneten Mitte des Helicotremas.

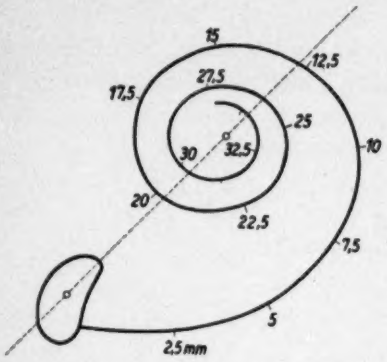

Abb. 9. Krümmung und Länge der Schneckenmembran

Bestimmt man aus Querschnitten der Schnecke die Steigung der einzelnen Windungen, so zeigt sich, daß durch diese Steigung die Länge der Membran nur um maximal 2—3% größer wird als die Projektion. Daher wurde in der Abb. 9 auch die Länge der Kurve ausgemessen und eingetragen. Als Nullpunkt wurde dabei der Rand des Steigbügels angesetzt. An dieser Stelle biegt sich die Basilarmembran sehr stark unter die Zeichenebene, so daß sie verkürzt erscheint und etwa noch 1 mm in den Steigbügel hineinreichen würde, wenn man sie ausrichten würde. Doch dürften die physikalischen Verhältnisse am Schneckenanfang vorläufig sich nur sehr schwer erfassen lassen, so daß wir die Länge des schwingenden Flüssigkeitsfadens auch nicht genauer ausmessen können. Für die Gesamtlänge der Basilarmembran mit Berücksichtigung ihrer Krümmung am Steigbügel ergab sich im Mittel 35 mm.

Mit Hilfe dieser Karte läßt sich nun durch Vergleich mit dem Präparat eine Ortsbestimmung vornehmen, besonders wenn der Steigbügel und das Helicotrema sichtbar sind, wobei unter Umständen das Zeichenokular benutzt wird.

Bei manchen Versuchen wurde nur ein ganz kleines Stück des Kanales eröffnet. In diesem Falle kennt man nur die Richtung des Kanales, die nun mit der Richtung der Verbindungslinie zwischen Steigbügelmitte und Helicotrema verglichen wurde. Nachdem der Winkel zwischen diesen beiden Richtungen durch Drehen des Okulares im Mikroskop bestimmt wurde, läßt sich aus der Abb. 10 die zugehörige Länge der Basilarmembran vom Steigbügelrand ermitteln. Die Abb. 10 wurde aus der Abb. 9 durch Bestimmung der Tangentenrichtungen erhalten. In den meisten Fällen dürfte es jedoch schon genügen, die Abb. 9 in die gleiche Lage zu bringen wie das Präparat und unmittelbar die Entfernung vom Steigbügel an den Zahlen abzulesen. Da die Abb. 9 sich auf ein von der Schneckenspitze aus gesehenes rechtes Ohr bezieht, so stellt man für die übrigen Fälle noch eine spiegelbildliche Kopie der Zeichnung her.

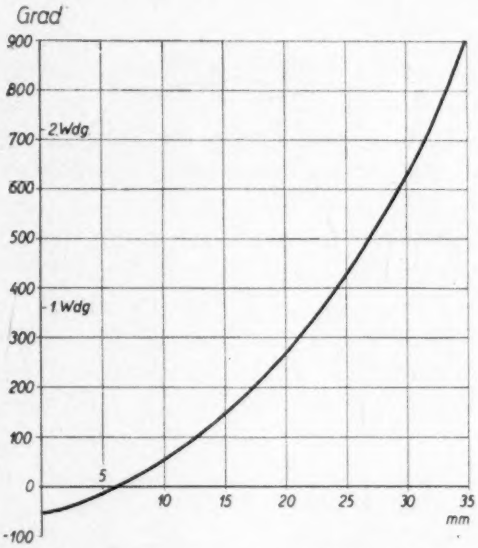

Abb. 10. Beziehung zwischen Neigungswinkel und Länge der Basilarmembran

4. Über die statische Elastizität der Schneckentrennwand

Nachdem gezeigt wurde, daß die elastischen Eigenschaften der Basilarmembran in der Längs- und Querrichtung ganz gleichartig sind, so ist nun die Größe ihrer Elastizität zu bestimmen. Trotz der großen Zahl von theoretischen Erwägungen über die Zunahme der Nachgiebigkeit beim Annähern an die Schneckenspitze wurde die Ortsabhängigkeit der Elastizität meines Wissens noch nicht bestimmt.

Nur auf Anregung von Prof. RANKE wurde von BERENDES[8]) an einer Stelle die Nachgiebigkeit gemessen, indem die Einsinktiefe eines auf die Mitte der Basilarmembran gesetzten Stiftes in Abhängigkeit der Druckkraft untersucht wurde. Eine Schwierigkeit bei diesen Messungen besteht darin, daß die Basilarmembran keine straffe Membran, sondern eher eine aus verschiedenartigen gallertartigen Schichten bestehende Masse ist, so daß beim Eindrücken eines Stiftes zunächst der Stift in die gallertartige Masse einsinkt und erst später zu einer Ausbuchtung der ganzen Membran führt. Auf diese Weise geht die Proportionalität zwischen Einsinktiefe und Druck verloren.

Wegen dieser stellenweise gallertartigen Oberfläche erschien es zweckmäßig, die Ausbuchtung der Schneckentrennwand unter den gleichen Bedingungen zu untersuchen, wie sie in Wirklichkeit auftritt, nämlich bei einem gleichförmigen auf die Membran verteilten Druck. Zu diesem Zweck wurde das Mittelohr senkrecht zur Schneckenachse durchsägt, wobei die Richtung der Schneckenachse sich aus dem Verlauf der Hörnerven ergibt, so daß der Steigbügel und das runde Fenster frei wird. Die über dem runden Fenster liegenden Hautschichten wurden sorgfältig entfernt und mit einem spitzen Bohrer die Membran des runden Fensters durchstochen. Auf das runde Fenster kam, wie die Abb. 11 zeigt, ein kleiner Messingring der mit einer Drahtschleife versehen war. Durch entsprechendes Biegen der Drahtschleife kann erreicht werden, daß der Ring auf dem Rande des runden Fensters gut aufliegt. Hierauf wird der ganze Rand mit dem Zinkoxydphosphatzement der Zahnärzte auf den Knochen geklebt, derart, daß der Ring luftdicht schließt. Nach diesen Vorbereitungen kommt der Knochen unter Wasser und es wird die Schneckenspitze angeschliffen. Dies gelingt sehr leicht vom Mittelohr aus, da nach der Karte der Abb. 9 aus der Lage des Steigbügels ganz genau die Lage des Helicotremas sich an der Knochenoberfläche bestimmen läßt. Da ferner die Knochenwand hier meist sehr dünn ist, so schimmert nach kurzem Bohren mit dem Finierer der Abb. 6a die innerste Schneckenwindung durch. Es ist auch nicht schwer zu erreichen, daß bei der Eröffnung des Schneckenkanales die REISSNERsche Membran unversehrt bleibt.

Um eine Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten der Trennwand herstellen zu können,

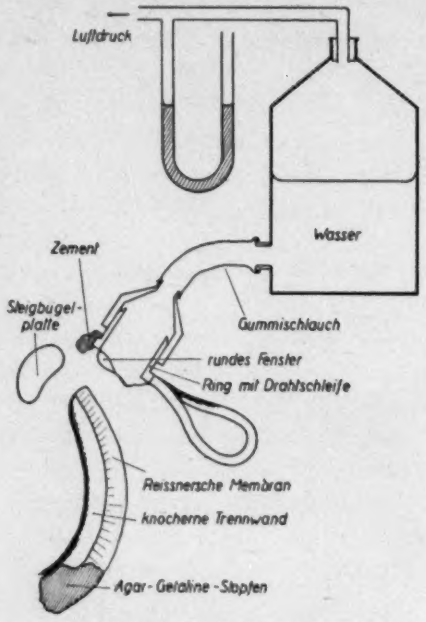

Abb. 11. Anordnung zur Messung der statischen Elastizität der Schneckentrennwand

wurde das Helicotrema mit einer warmen Agar-Gelatine-Mischung[9]) verstopft. Zur Herstellung der Druckänderung diente eine kleine Flasche, die am besten in die Präparationswanne der Abb. 4 gestellt wird, so daß über die am Boden befindliche Öffnung die Flüssigkeit der Flasche und der Wanne kommunizieren. Auf die untere Öffnung der Flasche kam eine sehr leicht bewegliche dünne Gummiröhre (Ventilgummi) mit einer Erweiterung, die genau auf den Messingring des runden Fensters paßt, und nach beendeter Präparation auf ihn geschoben wurde. Bei einem meist mit dem Mund ausgeübten Druck oder Sog in der Flasche konnte die Verschiebung der Schneckentrennwand beobachtet werden.

[8]) BERENDES, Z. Hals- usw. Hk. 36 (1934), S. 338.

[9]) 6 Gewichtsteile Agar + 4,5 Gewichtsteile Gelatine + 30 Gewichtsteile Wasser im eingedampften Zustand.

Da die REISSNERsche Membran, besonders bei stärkeren Vergrößerungen schwer sichtbar ist, so wurde mit einem Glasstab ein Flüssigkeitstropfen über die präparierte Stelle gebracht, in dem sich ganz kleine Silberkristalle befanden[10]), die bei richtig eingestellter Größe auf die Schneckentrennwand herabsinken.

Hat man die Beobachtungen an der Schnekkenspitze beendet, so löst man vorsichtig den Druckschlauch vom Ring des runden Fensters ab und schlitzt den Schneckenkanal weiter auf, bohrt einen Teil der Schneckentrennwand ab und verschließt die zum runden Fenster führende Kanalhälfte wieder mit einem Agar-Gelatine-Stopfen. Da besonders der obere Teil der Schneckenachse verhältnismäßig leicht beweglich ist, so ist sehr darauf zu achten, daß auf ihn kein seitlicher Druck ausgeübt wird, da sonst an der ganzen Windung der Schnecke gezerrt wird.

Es zeigt sich nun, daß längs dem ganzen Schneckenkanal bis unmittelbar in der Nähe des Steigbügels bei einer Druckdifferenz nicht nur die durch die REISSNERsche Membran hindurchschimmernde Basilarmembran bewegt wird, sondern die ganze Trennwand, wie es die Abb. 12 darstellt. Dabei biegt sich die Trennwand wie ein elastischer Stab, der an einem Ende frei ist, während das andere Ende festgehalten wird. Besonders auffallend und deutlich feststellbar ist, daß sich der untere Ansatz der REISSNERschen Membran fast mit maximaler Amplitude bewegt.

Es ist ferner festzustellen, daß die gallertartige Masse zwischen der REISSNERschen Membran und der Basilarmembran besonders in der Nähe des Helicotremas die Steifigkeit der Schneckentrennwand vergrößert, denn wischt man etwa mit einem Pinsel die REISSNERsche Membran und die gallertartige Masse ab, so werden die Ausbuchtungen der Basilarmembran an der Schneckenspitze fast zweimal größer.

Die Elastizität der Schneckentrennwand ist abgesehen von den mechanischen Einwirkungen verhältnismäßig unempfindlich. So zeigte sich kein Unterschied, wenn bei der Präparation statt der physiologischen Lösung Leitungswasser verwendet wurde. Auch ergab die Schnecke eines 2 Wochen lang in Lysoformlösung aufbewahrten Felsenbeines keinen Unterschied in der Elastizität gegenüber einem vollkommen frischen Felsenbein.

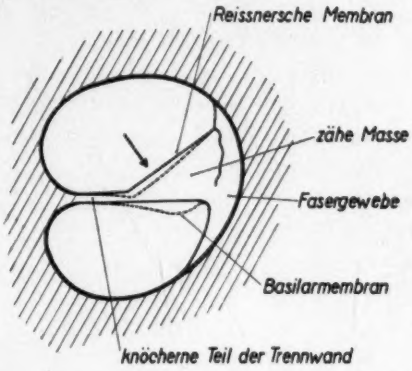

Abb. 12. Die Ausbuchtungsform der Schneckentrennwand bei einer Einwärtsbewegung des Steigbügels

Die benutzten Druckunterschiede wurden so eingestellt, daß an der betreffenden Stelle die maximale Ausbuchtung etwa 0,01 mm betrug. Die zu dem betreffenden Druck gehörigen Formen der Ausbuchtung wurden mit dem

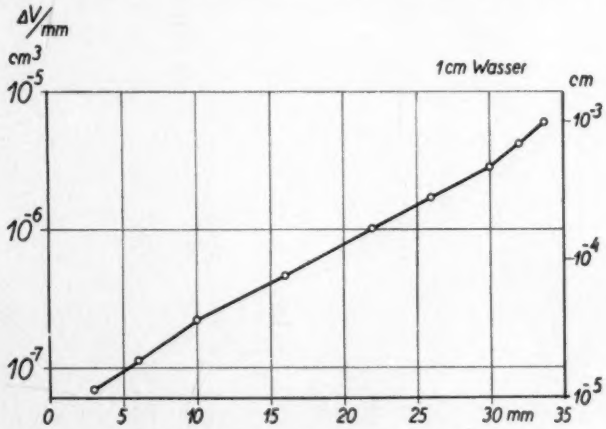

Abb. 13. Volumenverschiebung pro mm des Schneckenkanales und maximale Ausbuchtung der Schneckentrennwand bei einem einseitigen Überdruck von 1 cm Wassersäule

Zeichenokular abgezeichnet und die Ausbuchtungsfläche ausgemessen. Auf diese Weise konnte die Volumenverschiebung berechnet werden, die auf 1 mm Länge des Schneckenkanals bei einem Überdruck von 1 cm Wasser-

[10]) U. SCHMIESCHECK, Z. techn. Phys. 15 (1934), S. 178.

säule kommt. Die längs dem Schneckenkanal erhaltenen Volumenverschiebungen sind in der Abb. 13 dargestellt, wobei die Abszisse die Entfernung der Meßstelle von dem Steigbügel, entsprechend der Abb. 9, angibt. Wie ersichtlich, nimmt die Nachgiebigkeit vom Steigbügel bis zum Helicotrema wie etwa 1:100 zu.

Da längs dem Schneckenkanal die Abmessungen der REISSNERschen Membran und ihre Durchbiegungsform sich nur wenig ändert, so sind die maximalen Verschiebungen näherungsweise dem Verschiebungsvolumen proportional. Es kann daher mittels der rechten Skala der Abb. 13 die maximale Verschiebung der Schneckentrennwand ermittelt werden, die bei einer Druckdifferenz von 1 cm Wasser entsteht.

5. Über die Durchbiegungsform der Schneckentrennwand und die Stärke der im Ohr beobachtbaren Untertöne

Es ist eine auffallende Erscheinung, daß bei einem reinen Ton die im Ohr entstehenden Obertöne verhältnismäßig groß ausfallen, während Untertöne nicht hörbar sind. Beobachtet man z. B. einen reinen Ton von 600 Hz, so lassen sich selbst mit der Methode des schwebenden Hilfstones normalerweise in dem Frequenzgebiet von 200—500 Hz Untertöne nicht nachweisen, trotzdem die Tonverdeckung der tieferen Töne verhältnismäßig klein ist.

Theoretisch würde man die Entstehung derartiger Untertöne erwarten. Denn besteht die Schneckentrennwand aus einer Membran, die durch Druckschwankungen der über ihr liegenden Flüssigkeitssäule in Schwingungen versetzt wird, so ist es nicht zu vermeiden, daß sich bei steigender Zunahme der Schwingungszahl die Membran schließlich unterteilt und mehrere Schwingungsbäuche im Querschnitt des Schneckenkanals entstehen. Es würden sich daher bei einer gegebenen Frequenz der Steigbügelschwingungen längs dem Schneckenkanal nicht nur eine, sondern mehrere ausgezeichnete Schwingungsstellen ausbilden. Diese Störung wird dadurch vermindert, daß der mit der Grundfrequenz schwingende Teil der Schneckentrennwand dem Steigbügel näher liegt als die Stelle, an denen ein Unterton entstehen kann, so daß der größte Teil der vom Steigbügel erzeugten Flüssigkeitsströmungen sich bereits vorher ausgleicht und damit die Druckschwankungen an der Stelle des Untertones stark vermindert erscheinen. Jedenfalls ist es für die Unterdrückung der Untertöne wichtig, daß die Stelle der Untertöne von der Stelle des Grundtones längs des Schneckenkanals möglichst weit entfernt ist.

Da nun bekanntlich die Eigenfrequenzen der verschiedenen Schwingungssysteme nicht gleich weit voneinander entfernt sind, so ist zu untersuchen, ob die Schwingungsart der Schneckentrennwand in dieser Beziehung besonders geeignet ist. Betrachtet man die Abb. 12, so erscheint die Auslenkung der Schneckentrennwand sehr ähnlich mit derjenigen eines einseitig eingeklemmten Stabes, dessen freies Ende mit einer Membran, der Basilarmembran, abgedichtet ist. Besonders in den Kanalwindungen in der Nähe des Steigbügels ist diese Bewegungsart deutlich ausgebildet. Trägt man nun, wie die Abb. 14 darstellt, die Eigenfrequenzen verschiedener Schwingungssysteme als Vielfaches der Grundfrequenz auf, so zeigt sich, daß in der Tat beim einseitig eingeklemmten Stab die höheren Eigenfrequenzen vom Grundton am meisten entfernt sind. Bei der Schneckentrennwand nimmt die Steifigkeit nach dem beweglichen Ende hin ab, denn die Trennwand geht aus einer knöchernen Struktur in eine Membran über. Für diesen Fall, der einem einseitig freien sich verjüngenden Stab

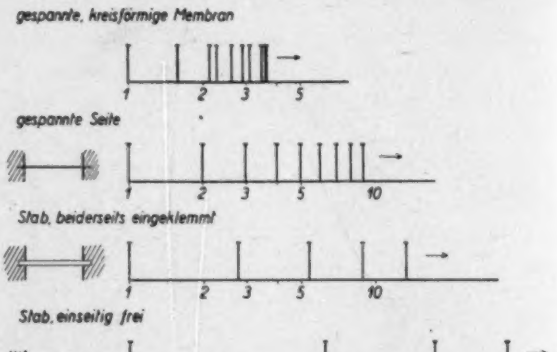

Abb. 14. Die Eigenfrequenzen verschiedener Schwingungssysteme als Vielfaches der Grundfrequenz

gleicht, liegen die Eigenfrequenzen noch weiter auseinander als bei dem homogenen Stab[11]).

6. Über die Messung der mechanischen Impedanz ganz kleiner Schwingungssysteme

Um bei möglichst kleinen Schwingungen die Elastizität messen zu können, wurde noch eine akustische Methode benutzt. Sie bestand im wesentlichen darin, daß das Ende einer schallführenden Röhre mit der zu messenden Membran abgeschlossen wurde. Aus dem am Röhrenende entstehenden Schalldruck und den zugehörigen kleinen Volumenverschiebungen der Membran konnte die Impedanz bestimmt werden. Um die entstehenden Volumenverschiebungen zu messen, bestehen, wie die Abb. 15 zeigt, zwei Möglichkeiten. Bei der ersten

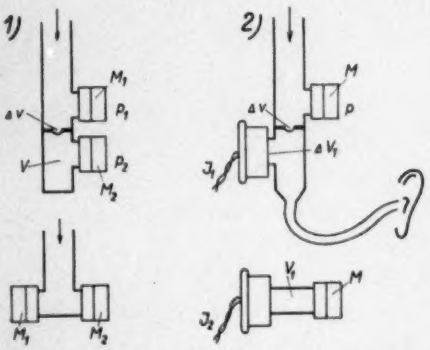

Abb. 15. Anordnung zur Messung der mechanischen Impedanz von sehr kleinen Membranen

Methode schließt man die Membran von der anderen Seite mit einem bekannten kleinen Volumen V ab und mißt mit dem Mikrophon M_2 die Druckschwankungen p_2 die in dem Volumen V durch die kleinen Volumenverschiebungen Δv der zu messenden Membran entstehen. Dabei ergibt sich für die Impedanz

$$\frac{\Delta v}{p} = n \cdot \frac{V}{\varrho c^2} \cdot \frac{p_2}{p_1}, \tag{1}$$

wenn ϱ die Dichte der Luft, c die Schallgeschwindigkeit in Luft und p_1 den mit dem Kondensatormikrophon M_1 am Röhrenende gemessenen Schalldruck darstellt, und vorausgesetzt wurde, daß die Nachgiebigkeit des Volumens V sehr viel größer ist als die der Membran, so daß die Membranschwingungen durch das Volumen V nicht abgebremst werden. Sind die beiden Mikrophone M_1 und M_2 nicht gleich empfindlich, so daß beim Anschluß an einem kurzen T-Rohr das Mikrophon M_1 eine $n$mal größere Wechselspannung ergibt als M_2, so ist die Impedanz noch mit n zu multiplizieren.

Da im allgemeinen wegen des Elektronenrauschens mit dem freien Ohre kleinere Schalldrucke wahrgenommen werden können als mit einem Kondensatormikrophon, so wurden bei der zweiten Methode für besonders kleine Volumenverschiebungen die bei einem Schalldruck p auftretenden Volumenverschiebungen Δv der Membran durch die Volumenverschiebungen einer kleinen Fernhörermembran kompensiert. Werden die Volumenverschiebungen des Fernhörers ΔV_1 bei einem Strom J_1 gleich groß wie die Volumenverschiebungen der Membran und wird die Phase richtig eingestellt, so ist nichts zu hören. Koppelt man nun den Fernhörer über einem Volumen V_1 mit dem zur Druckmessung am Röhrenende benutzten Kondensatormikrophon und stellt den Fernhörerstrom J_2 so ein, daß der Schalldruck der gleiche bleibt, so berechnet sich die Impedanz der Membran nach

$$\frac{\Delta v}{p} = \frac{V_1}{\varrho c^2} \cdot \frac{J_1}{J_2}. \tag{2}$$

Es läßt sich auf diese Weise durch eine Volumenmessung und den mittelst einer Eichleitung in einem sehr großen Bereich leicht einstellbaren Fernhörerstrom die Impedanz bestimmen. Allerdings wurde dabei vorausgesetzt, daß die Membran des Fernhörers eine genügende Schallhärte besitzt, derart, daß sich ihre Schwingungsamplitude nicht ändert, wenn sie mit dem Volumen V_1 gekoppelt wird. Man kann dies durch Abhören von der anderen Membranseite aus oder durch Berühren des Fernhörergehäuses mit einem zwischen den Zähnen gehaltenen Holzstab leicht überprüfen.

Die Zusammenstellung der gesamten Versuchsapparatur zeigt die Abb. 16. Der Generator arbeitet auf zwei Eichleitungen, von denen die obere über einem geschirmten Transformator und einer zweiten Eichleitung mit dem Fernhörer verbunden ist. Da Strom-

[11]) Hort-Thoma, Die Differentialgleichungen der Technik und Physik, 3. Aufl., 1939, S. 364.

stärkenverhältnisse bis zu 10^6 gemessen werden müssen, so war eine entsprechende Schirmung nicht zu vermeiden. Die untere Eichleitung war über einem Phasendreher mit dem Lautsprecher verbunden. Um aus der Formel (2) auch die Phase der Membranimpedanz bestimmen zu können, diente ein Kathodenoszillograph, an dessen eines Plattenpaar die Generatorspannung kam, während dem anderen Plattenpaar die vom Schalldruck am Röhrenende herkommende Mikrophonspannung bei der Kompensation zugeführt wurde. Aus der Form der entstehenden Ellipse kann die Phase bestimmt werden. Der zum Ohre führende Gummischlauch ist seitlich mit einer kleinen Kapillare versehen, derart daß beim Einstecken des Gummischlauches in den Gehörgang kein Überdruck auf der zu messenen Membran entsteht.

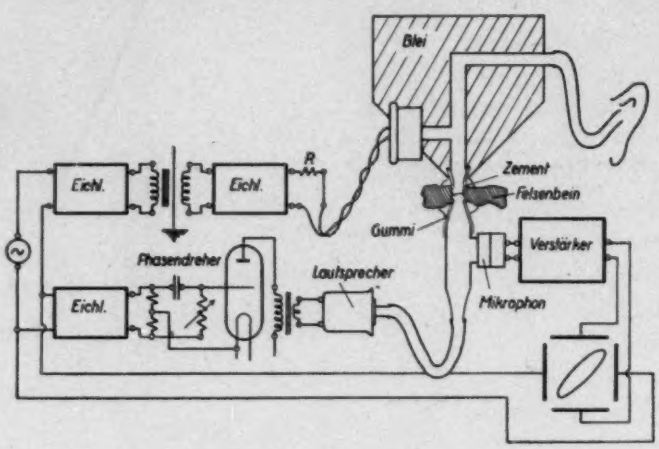

Abb. 16. Anordnung zur Messung der dynamischen Elastizität der Schneckentrennwand

Zur Impedanzmessung stellt man mit dem Ohre die Kompensation ein, liest die Eichleitung des Fernhörers und die Phase ab, koppelt hierauf den Fernhörer direkt mit dem Mikrophon und verstellt die Eichleitung so, daß das Mikrophon den gleichen Schalldruck zeigt. Die Differenz zwischen den beiden Stellungen der Eichleitung und zwischen den Phasen ergibt das Verhältnis J_1/J_2.

Mit dieser Methode wurden Kontrollmessungen der Schneckentrennwandimpedanz ausgeführt. Hierzu wurde die Schnecke mit der Anordnung der Abb. 8 an einer Stelle beiderseits der Schneckentrennwand eröffnet. Nach dem Herausnehmen aus dem Wasser wurde die Trennwand mit dem Zinkoxyphosphatzement bis auf eine etwa 3 mm lange Strecke mit dem Knochen verklebt. Die Knochenscheibe wurde hierauf auf einen größeren Bleiklotz zementiert, derart, daß der bewegliche Teil der Membran luftdicht mit der Abhörröhre verbunden war. Auf der unteren Seite der Knochenscheibe wurde mittelst einer Gummiröhre Schall zugeführt, wobei das Ende des Gummirohres ebenfalls an den Knochen zementiert wurde.

Die erhaltenen Impedanzwerte sind etwas kleiner als die statisch gemessenen Werte, wahrscheinlich deshalb, da durch das Festkleben der Schneckentrennwand ihre Beweglichkeit etwas kleiner ist als im normalen Zustand, wo die Trennwand nicht nur auf einer Länge von 3 mm, sondern auf einer größeren Länge frei schwingen kann.

Zusammenfassung

Nachdem zur Präparation der Schnecke besondere Hilfseinrichtungen besprochen werden, wird die Ortsabhängigkeit der Elastizität der Schneckentrennwand bestimmt. Ferner wird gezeigt, daß durch die Schwingungsform der Schneckentrennwand das Entstehen von Untertönen vermieden wird und die Basilarmembran keine Eigenspannung besitzt.

Die Versuche wurden von der Széchenyi-Gesellschaft, Budapest, unterstützt.

(Eingegangen am 21. April 1941.)

Über die subjektive Wirkung von Klangfarbenänderungen*)

Von Emil Löb

(Mit 24 Textabbildungen)

A. Einleitung

Als grundlegendste Arbeiten auf dem Gebiet der Klangfarbenforschung sind wohl die Untersuchungen von H. v. HELMHOLTZ[1]) und C. STUMPF[2]) zu nennen. HELMHOLTZ verwandte zu seinen Untersuchungen an Klängen Ohrresonatoren, mit denen er subjektiv einzelne Teiltöne eines Klanges beobachten und ihrer Stärke nach vergleichen konnte. Er stellte weitere Untersuchungen mit einem System von Stimmgabeln an, die durch eine Hauptstimmgabel elektrisch erregt wurden. Die an diesen Stimmgabeln angekoppelten Resonatoren erlaubten die Intensität der Teiltöne zu variieren und hiermit Änderungen der Klangfarbe hervorzurufen. C. STUMPF ging den umgekehrten Weg, er beobachtete die Änderung der Klangfarbe durch Auslöschen einzelner Teiltöne in einem Interferenzsystem. Erst durch die Einführung moderner Schallmeßverfahren wird es auch ermöglicht, die zur Wahrnehmung einer Klangfarbenänderung erforderlichen Änderungen eines Klanges zu messen. Nach H. v. HELMHOLTZ versteht man unter Klangfarbe die Eigentümlichkeiten eines Klanges, die durch seine Schwingungsform gegeben sind. HELMHOLTZ schließt daraus, „daß Klänge von gleicher Klangfarbe auch immer dieselben Kombinationen von Partialtönen enthalten müssen“[3]). Solange es sich hierbei um stationäre Klänge handelt, ist das Verhältnis der Teiltonamplituden zueinander ein objektives Merkmal für die Klangfarbe. Zur Charakterisierung von Klängen im allgemeinen und insbesondere von Instrumentenklängen sind darüber hinaus nach neueren Erkenntnissen die Ausgleichsvorgänge von besonderer Bedeutung[3]).

In der vorliegenden Arbeit sollen vorwiegend die Klangfarbenänderungen musikalischer Klänge näher untersucht werden, die durch Änderung der Teiltonamplituden einzelner Teiltöne entstehen. NAHRGANG[4]) entwickelte hierfür eine Apparatur, die es gestattet, acht harmonisch zueinander liegende Teiltöne einzustellen, deren Lautstärken einzeln verändert werden können. Als Maß für die Lautstärke bezog NAHRGANG die zu messenden Schalldrücke auf den Schalldruck an der Hörschwelle, da diese Messungen am einfachsten vor allem mit gewöhnlichen Schallgebern durchzuführen sind. Die vorliegende Arbeit führt die von NAHRGANG gemachten Untersuchungen weiter, indem die Messung der Schallintensität nicht subjektiv (mit Hilfe von Hörschwellenmessungen), sondern objektiv vorgenommen wurde. Die objektive Messung ist besonders dann wertvoll, wenn die Unterschiedsschwellen der Intensitäten (KNUDSEN-Kurven) gemessen werden, da hierbei eine exakte Bestimmung des Schalldruckes an der Hörschwelle notwendig ist. Besonderer Wert muß bei diesen Messungen auf weitgehende Verzerrungsfreiheit vor allem von nichtlinearen Verzerrungen des Schallgebers gelegt werden; es wurde deshalb für diese Messungen ein elektrostatischer Kopfhörer benutzt.

Die folgenden Untersuchungen werden also darauf hinausgehen, die zur subjektiven Empfindung einer Klangfarbenänderung erforderliche Reizänderung dE durch Messung der zugehörigen Schalldruckänderung einzelner Teiltöne in einem Klange zu ermitteln. Es ergeben sich dabei aus den Messungen bei verschiedenen Intensitäten und Tonhöhen die Werte $\frac{dE}{E}$ für die Klangfarbenänderung; gege-

*) D 90.

[1]) H. v. HELMHOLTZ, Die Lehre von den Tonempfindungen. 3. Ausg., Braunschweig 1870.

[2]) C. STUMPF, Die Sprachlaute. Berlin 1926.

[3]) H. BACKHAUS, Z. techn. Phys. 13 (1932), H. 1, S. 31.

[4]) S. NAHRGANG, Akust. Z. 3 (1938), H. 3, S. 284.

benenfalls können dann Abweichungen vom WEBER-FECHNERschen Gesetz festgestellt werden.

B. Versuchsapparatur und Meßverfahren

Die Klangsynthesen wurden mit einem Gerät durchgeführt, das acht harmonische Teiltöne herzustellen gestattet und in der Arbeit von NAHRGANG[4]) näher beschrieben ist. Diese Apparatur arbeitet im Prinzip so, daß die Schwingungen zweier Hochfrequenzsender S_I und S_{II} (Abb. 1) in zwei Verzerrerstufen V_I und V_{II} so verzerrt werden, daß man neben der Grundschwingung stark ausgeprägte Oberschwingungen erhält. Diese so verzerrten Schwin-

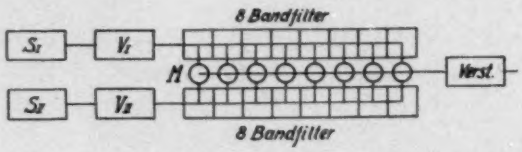

Abb. 1. Schematische Darstellung der Apparatur zur Erzeugung harmonischer Tonfrequenzen

gungen gelangen auf je acht Bandfilter, die harmonisch zur Grundfrequenz abgestimmt sind. Zur Bildung der Differenzfrequenz jeweils einander zugehöriger Hochfrequenzen werden acht Mischröhren M benutzt, deren Anodenseiten über Tonfrequenztransformatoren parallel geschaltet sind. Die Amplitudenregelung der Niederfrequenzspannung geschieht durch Regelung der Gittervorspannung an den Steuergittern der Misch- (Regel) Hexoden. Die Tonhöhe kann durch Ändern der Frequenz des Hochfrequenzsenders S_{II} eingestellt werden, so daß jede beliebige Grundtonfrequenz (Differenzfrequenz) zwischen etwa 30 Hz und 10000 Hz gebildet werden kann.

Die Messung mit dieser Apparatur wird dadurch erschwert, daß die entstehenden Mischfrequenzen kleine Amplituden haben und von verhältnismäßig starkem Stromverteilungsrauschen begleitet sind. Die notwendige große Verstärkung ist daher auch sehr empfindlich gegen Brummspannungen. Störungsfreie Messungen gelangen nur durch Anwendung von Anodenakkumulatoren und Vermeidung jeglicher von den Netzgleichrichtern herrührenden Streuungen. Außerdem muß das Verhältnis von Nutzspannung zur Rauschspannung dadurch ein Optimum werden, daß die in der verzerrten *H-F*-Schwingung enthaltenen Teilschwingungen von möglichst gleicher und genügender Größe sind. Ein solches Oberwellenspektrum kann nur erhalten werden, wenn hohe *H-F*-Spannungen auf eine entsprechend stark negativ vorgespannte Gleichrichterstufe gegeben werden, so daß nur die verhältnismäßig hohen Spitzen der Gitterwechselspannungen zur Steuerung der Verzerrerstufen beitragen.

Schwierigkeiten bereitete auch die bequeme Einstellung der notwendigen Schalldrücke. Die schlechte Annäherung einer logarithmischen Unterteilung der Widerstandsschicht üblicher Potentiometer bringt es mit sich, daß die in Frage kommenden Spannungswerte sich auf einen kleinen Teil der Skala zusammendrängen. Es wurden daher zur genaueren Regelung noch kleinere Drehwiderstände zu den größeren in Reihe geschaltet.

Um zu ermitteln, um welchen Betrag die Schalldruckamplitude eines Teiltones geändert werden muß, um eine eben merkliche Klangfarbenänderung hervorzubringen, ist zunächst in einem beliebigen Klange der absolute Schalldruck P jedes darin enthaltenen Teiltones festzustellen. Sodann ist für einen Teilton die Änderung ΔP seines Schalldruckes nach zu- bzw. abnehmenden Schalldrücken hin zu bestimmen, durch die eine Änderung des subjektiven Klangeindruckes eben bemerkbar wird.

Zuerst wurde versucht, die Untersuchungen mittels eines Lautsprechers im freien Schallfeld auszuführen. Dieses Verfahren stellte hohe Anforderungen an die Konstanz des Kontrollgerätes zur Schalldruckmessung; eine gleichbleibende Empfindlichkeit des hierzu verwendeten Kondensatormikrophones konnte aber nicht in genügendem Maße erreicht werden. Außerdem ist man hierbei gezwungen, die Messungen in einem sehr guten schallgedämpften Raume auszuführen.

Diese Nachteile treten nicht auf, wenn man mit geeigneten und geeichten Kopfhörern arbeitet. Vor allem bei sehr kleinen Laut-

stärken lassen sich die Schalldrücke hierbei besser bestimmen als im freien Schallfeld mit den unvermeidlichen Brummgeräuschen.

Der Frequenzgang des benutzten elektrostatischen Kopfhörers wurde mit einem künstlichen Ohr gemessen. Hierdurch ist — in Verbindung mit einer Absoluteichung — der Zusammenhang zwischen Spannung und Schalldruck ein für allemal bekannt. Die am Hörer liegende Tonwechselspannung wird über einen zweistufigen Verstärker einem Diodengleichrichter zugeführt; als Anzeigeinstrument diente ein in Effektivwerten geeichtes Mikroampèremeter.

1. Das verwendete Mikrophon

Für die nach dem ersten Meßverfahren im freien Schallfeld ausgeführten Untersuchungen wurde zur Schalldruckmessung zunächst ein Kondensatormikrophon benutzt, das zur Aufnahme des Frequenzganges in bekannter Weise elektrostatisch angezupft wurde[5]). Das Mikrophon war zusammen mit einem zweistufigen Vorverstärker in einer Kugel von $d = 15$ cm Durchmesser untergebracht. Der aus der elektrostatischen Druckeichung erhaltene Frequenzgang des Mikrophones ist für Messungen im freien Schallfeld nicht ohne weiteres brauchbar. Beim Auftreffen von ebenen Schallwellen auf das Mikrophon bewirken diese eine mit der Frequenz zunehmende Druckerhöhung durch Reflexion, die durch eine Korrektur ausgeglichen werden muß. Zur Überführung der Druckeichung in die Feldeichung dienten die Ballantine-Kurven. Ballantine[6]) berechnete die an einer Kugel im freien Schallfeld entstehenden Feldverzerrungen für einige Kugeldurchmesser in Abhängigkeit von der Frequenz. Die notwendige Korrektur wurde durch entsprechende Dimensionierung des zweistufigen Vorverstärkers vorgenommen. Den korrigierten Frequenzgang des Mikrophones zeigt Abb. 2, stark ausgezogene Kurve. Der Frequenzgang des Schalldruckes, wie er sich nach der Theorie von Ballantine im freien Schallfeld bei Anwesenheit der Mikrophonkugel von $d = 15$ cm Durchmesser bei gleichbleibenden Schalldruckamplituden ergeben würde, ist gestrichelt gezeichnet. Wie man sieht, stimmt der erhaltene Verlauf genügend genau überein mit dem sich aus der Korrektur ergebenden. Für die späteren Messungen erforderte das oben erwähnte endgültige Meßverfahren zur Aufnahme des

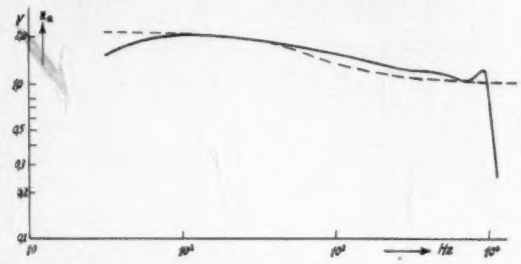

Abb. 2. Frequenzgang des Kondensatormikrophones mit Ballantine-Korrektur $p = 2\,\mu b = \text{const.}$

Kopfhörerfrequenzganges und dessen Absoluteichung ein absolut geeichtes Kondensatormikrophon in Kugelform mit besonders kleinen Abmessungen. Das Mikrophon wurde am künstlichen Ohr an einer hierfür vorgesehenen Stelle angebracht und besaß einen Durchmesser von $d = 35$ mm. Die Herstellung eines so kleinen Mikrophones mit einem geeigneten Frequenzgang und genügender Empfindlichkeit bereitete anfangs einige Schwierigkeiten, deren Überwindung erst durch längere Untersuchungen ermöglicht wurde. In der Hauptsache wurden diese Untersuchungen mit verschiedenen Gegenelektroden durchgeführt und der Einfluß der Elektrodenform auf den Frequenzgang festgestellt.

Abb. 3 zeigt das Mikrophon im Schnitt. In Abweichung von den üblichen Ausführungen ist insbesondere der in der Abbildung ersichtliche Federring F zu erwähnen, der es ermöglicht, den Abstand zwischen Gegenelektrode und Membran durch Drehen der Mutter M in den erforderlichen Grenzen zu verändern. Ebenso kann beim Auswechseln der Gegenelektrode die Spannung der Membran durch einen geeichten Spannring R immer wieder auf denselben Wert gebracht werden. Es hat sich

[5]) E. Meyer, Elektr. Nachr.-Techn. 4, 86 (1927), M. Grützmacher u. P. Just, Elektr. Nachr.-Techn. 8, 104 (1931).

[6]) St. Ballantine, J. Acous. Soc. Am. 3 (1932), S. 319.

gezeigt, daß diese Maßnahmen für vergleichende Versuche mit verschiedenen Gegenelektroden von ausschlaggebender Bedeutung waren. Im Hinblick auf die Aufgabe wurde auf eine präzise Messung des Abstandes kein Wert gelegt.

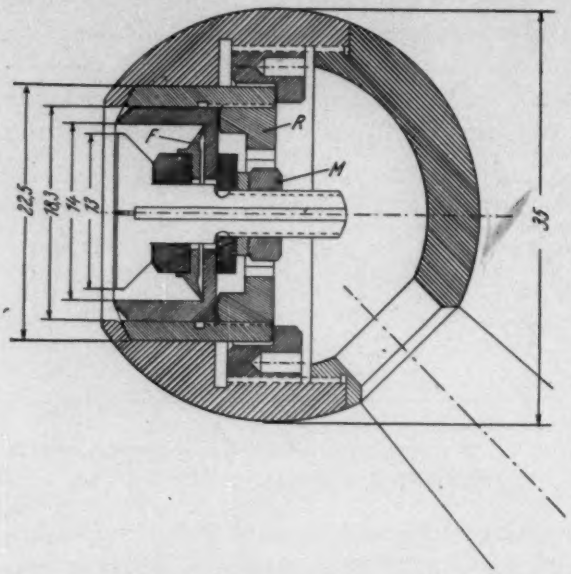

Abb. 3. Kondensatormikrophon

In Abb. 4 bis 7 zeigen die Kurven I bis IV den Frequenzgang des Mikrophones für verschiedene Elektrodenabstände.

Bekanntlich ist der Verlauf der Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Frequenz eines Kondensatormikrophones in hohem Maße durch seine Luftpolstereigenschaften bestimmt[7]). Die durch diese Lufträume bedingte Dämpfung setzt sich aus Reibungsdämpfung und Dämpfung durch Luftwirbelbildung zusammen. Die in Richtung der Membranbewegung auftretenden Reibungsverluste in den Kanälen, Schlitzen, Bohrungen usw. der Gegenelektrode sind von dem zwischen ihr und Membran eingeschlossenen Luftvolumen abhängig und bestimmen die Größe dieser Dämpfung. Diese Verluste müssen mit kleiner werdendem Elektrodenabstand infolge größerer Teilchengeschwindigkeit in den Kanälen zunehmen. Bei dem erforderlichen sehr geringen Abstand entstehen außerdem thermische Verluste und Verluste durch radial verlaufende Luftströmungen. Alle diese Verluste sind offenbar frequenzabhängig. Ein geeignetes Luftpolster kann man nun in bekannter Weise durch zweckmäßige Formung der Gegenelektrode herstellen. Die folgenden Untersuchungen wurden der Reihe nach an einem Mikrophon mit einer glatten Elektrode Abb. 4, an einer Elektrode mit zwei Lochreihen Abb. 5 und zwei Schlitzelektroden Abb. 6 und 7 durchgeführt. Als Membran wurde eine Duraluminiummembran von $d = 14$ mm Durchmesser benutzt, die bis nahe an die Fließgrenze gespannt war. Zur Aufnahme des Frequenzganges wurde das Mikrophon mittels einer Hilfselektrode elektrostatisch angezupft. Die Ergebnisse mit der glatten Elektrode und einer 5 μ starken Membran zeigt Abb. 4. Dabei wurde die Anzupfspannung konstant gehalten und die Spannung am Ausgang des Mikrophonverstärkers in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Bei sämtlichen Messungen wurde der Abstand zwischen Gegenelektrode und Membran, wie schon erwähnt, vom kleinstmöglichen Werte (jeweils Kurve I) ausgehend mehr und mehr vergrö-

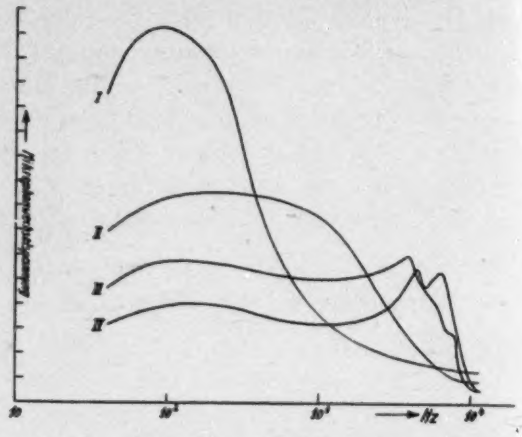

Abb. 4. Frequenzgang des Kondensatormikrophones mit glatter Gegenelektrode für verschiedene Elektrodenabstände

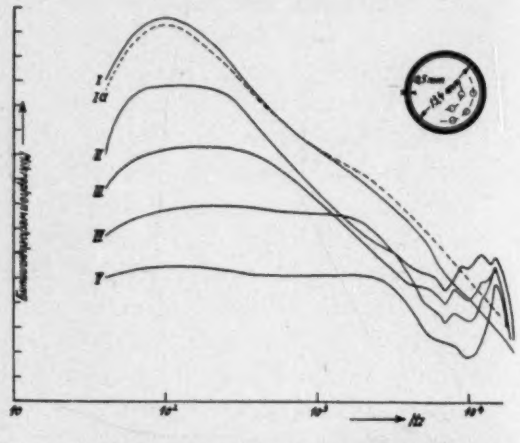

Abb. 5. Frequenzgang des Kondensatormikrophones mit Lochelektrode für verschiedene Elektrodenabstände

[7]) Vgl. hierzu auch die Arbeit von ERNSTHAUSEN, Arch. Elektrotechn. 31 (1937), H. 7, S. 4.

ßert. (Kurven II—IV.) Der kleinstmögliche Abstand wurde in einem Glimmlampenprüfkreis durch Entfernen der an der Gegenelektrode zunächst anliegenden Membran bei angelegter Mikrophonvorspannung ermittelt. Bei kleinem Elektrodenabstand muß man natürlich eine größere Empfindlichkeit des Mikrophones erwarten. Das trifft bei den tiefen Frequenzen, wie die Abbildungen zeigen, auch zu. Bei den höheren Frequenzen dagegen macht sich der erwähnte Einfluß der frequenzabhängigen Dämpfung so stark bemerkbar, daß bei kleinem Elektrodenabstand die Kurven bis auf z. T. sogar bis unter die Kurven für größeren Elektrodenabstand heruntergedrückt werden. Gleichzeitig sind noch Resonanzerscheinungen zu beobachten, die nicht von der Membranspannung herrühren, sondern in ihrer Frequenz wesentlich tiefer liegen als die Eigenfrequenz der Membran (etwa 18000 Hz). Die beiden Kammern vor und hinter der Membran sind am Rande der Gegenelektrode durch einen

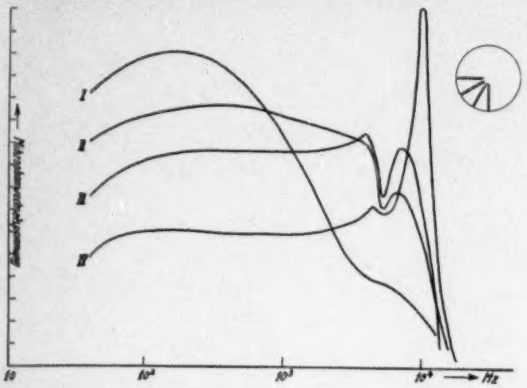

Abb. 6. Frequenzgang des Kondensatormikrophones mit Schlitzelektrode (12 Schlitze) für verschiedene Elektrodenabstände

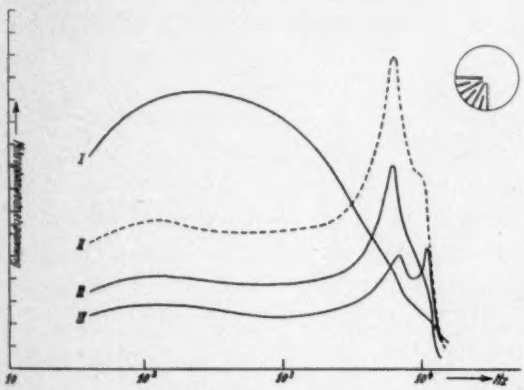

Abb. 7. Frequenzgang des Kondensatormikrophones mit Schlitzelektrode (24 Schlitze) für verschiedene Elektrodenabstände

ringförmigen Kanal von $b = 0{,}5$ mm Breite kommunizierend miteinander verbunden. Hierdurch entsteht eine Kopplung der beiden Hohlräume, die infolge der frequenzabhängigen Strömungsverhältnisse im Ringkanal ebenfalls frequenzabhängig wird. Einfache Resonanzkurven sind also von diesem Schwingungsgebilde nicht zu erwarten.

Es wurde zunächst bei grundsätzlich kleinstem Elektrodenabstand eine glatte Gegenelektrode (Abb. 4, I), dann eine Elektrode mit 20 auf einem Kreis verteilten Bohrungen von 1,5 mm Tiefe (Abb. 5, Kurve I), dann die gleiche Elektrode mit ganz durchgebohrten Löchern (Abb. 5, Kurve Ia), so daß also die beiden Luftkammern dadurch nochmals kommunizierend miteinander verbunden sind, untersucht. In Abb. 9 sind zusammen aufgetragen die Frequenzkurven für den kleinsten Elektrodenabstand Abb. 4, I, Abb. 5, I, Abb. 6, I und Abb. 7, I. Es zeigt sich aus den erhaltenen Kurven, daß zwar gegenüber der glatten Elektrode eine gewisse Verringerung der Dämpfung eintritt, daß aber das Anbringen so weniger Bohrungen praktisch noch nicht von ausreichendem Einfluß ist. Wie man sieht, werden beim kleinstmöglichen Abstande die hohen Frequenzen zu stark benachteiligt. Der Grund hierfür sind die radialen Luftströmungen, deren Einfluß mit größerem Abstand kleiner wird. Da aber im Interesse einer großen Empfindlichkeit ein kleiner Abstand erwünscht ist (große Kapazitätsänderung!), muß das Bestreben dahin gehen, an Stelle der vorwiegend radialen Luftbewegung diese Luft in Richtung der Membranbewegung in vielen kleinen Bohrungen schwingen zu lassen, weil in diesem Falle die Größe der Dämpfung ohne Änderung des Abstandes durch die Form und Zahl der Öffnungen zu beeinflussen ist. Außerdem zeigt sich, daß durch das Anbringen von Bohrungen trotz kleiner werdender wirksamer Elektrodenfläche eine größere Empfindlichkeit erzielt wird. Danach muß ein geeignetes Luftpolster durch möglichst gleichmäßige Verteilung *vieler kleiner* Luftpolster über die ganze Elektrodenfläche geschaffen werden, z. B. durch Bohren vieler kleiner Löcher oder Einsägen von feinen Schlitzen. Es wurde daher eine Schlitzelektrode mit zunächst 12 radialen Schlitzen von $b = 0{,}2$ mm Breite und $l = 6$ mm Länge untersucht, die mit der hinteren Kammer in Verbindung standen, Abb. 6. Der Verlauf der Kurven zeigt hier eine wesentlich geringere Benachteiligung der hohen Frequenzen, was wohl auf die strömungstechnisch geänderten Verhältnisse zurückzuführen ist.

Bei der Elektrode mit 24 Schlitzen (Abb. 7) ist der Verlauf der Empfindlichkeit noch günstiger.

Sehr auffallend ist das Maximum bei 10000 bzw. 6000—7000 Hz in Abb. 6 und 7. Es ist vorläufig noch nicht festzustellen, wodurch dieses Maximum entsteht. Die Resonanzen der Membran und des

Luftpolsters selbst müssen jedenfalls sehr viel höher liegen, etwa bei 20000 Hz und darüber. Es wurde auch festgestellt, daß ein weiteres Spannen bzw. Entspannen der Membran weder die Lage noch die Höhe dieser Resonanzspitze zu beeinflussen vermag.

Um den Einfluß der Membrandicke auf den Frequenzgang feststellen zu können, wurde bei einem beliebig gewählten Elektrodenabstand der Lochelektrode nochmals der Frequenzgang für die 5 μ starke Membran aufgenommen (Abb. 8, Kurve a).

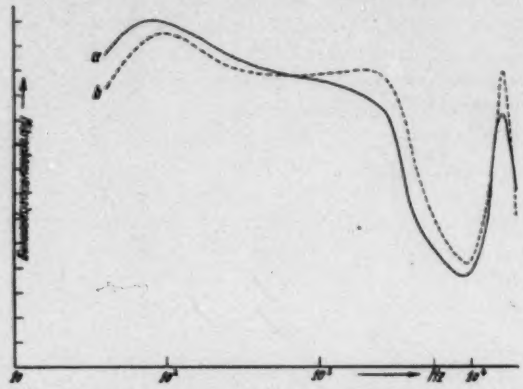

Abb. 8. Frequenzgang des Kondensatormikrophones mit Lochelektrode für verschiedene Membrandicken.
Kurve a: Membrandicke d = 0,005 mm,
Kurve b: Membrandicke d = 0,008 mm

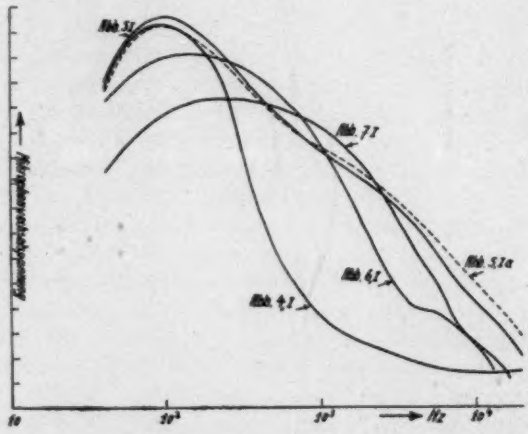

Abb. 9. Frequenzgänge der untersuchten Gegenelektroden für den kleinstmöglichen Elektrodenabstand

Danach wurde unter Beibehaltung dieses Abstandes der Versuch mit einer 8 μ dicken Membran wiederholt. Wie zu erwarten war, mußte hierbei die Empfindlichkeit infolge der größeren Membransteife in dem Bereich, in dem die Dämpfung noch ohne Einfluß ist, zurückgehen. Dies ist bis zu einer Frequenz von etwa 600 Hz der Fall. Nach höheren Frequenzen zu muß jedoch die Empfindlichkeit infolge des geringeren Einflusses der Luftdämpfung ansteigen (Abb. 8, Kurve b).

Für das Kondensatormikrophon, das nun endgültig zur Kopfhörereichung benutzt wurde, wurde als geeignetste Elektrode die Schlitzelektrode mit 24 Schlitzen verwendet. Der Membranabstand für den günstigsten Frequenzgang wurde durch Versuch ermittelt. Abb. 10 zeigt den Frequenzgang der Spannung des Mikrophones für konstanten Schalldruck in Verbindung mit einem zweistufigen Verstärker

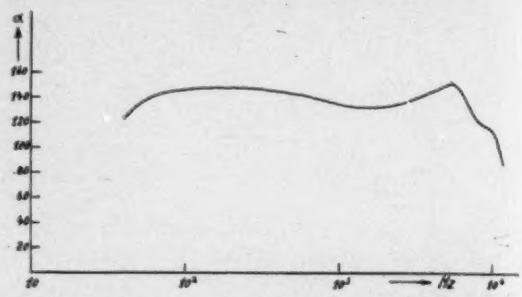

Abb. 10. Frequenzgang des Kondensatormikrofones zur Kopfhörereichung für konst. Schalldruck. $p = 7$ Dyn/cm²

und Diodengleichrichter. Als Ordinate ist der Ausschlag α in Skalenteilen des zur Richtstromanzeige verwendeten Mikroampèremeters aufgetragen. Der zweistufige Verstärker wird zusammen mit dem Diodengleichrichter für die Messung der Kopfhörer-Wechselspannung benutzt. Die mit Hilfe dieses Mikrophones aufgebaute Meßanordnung zur Eichung des elektrostatischen Kopfhörers besteht aus dem elektrostatischen Kopfhörer, der aus der Apparatur zur Klangsynthese gespeist und dessen Wechselspannung durch ein Röhrenvoltmeter gemessen wird, ferner dem künstlichen Ohr und dem beschriebenen kleinen Kugelmikrophon mit nachfolgendem vierstufigen Verstärker und Diodengleichrichter. Da hierfür keine BALLANTINE-Korrekturen nötig sind, gilt für die ganze Apparatur der in Abb. 10 gezeigte Frequenzgang.

2. Die Eichung des Kondensatormikrophones in der Druckkammer

Von den verschiedenen möglichen Verfahren zur Absoluteichung von Mikrophonen wurde hier das Druckkammerverfahren angewendet.

Nach den bisherigen Erfahrungen ist die Eichung in der Druckkammer die genaueste und zugleich auch die einfachste Methode, wie dies ERNSTHAUSEN[8]) in einer neueren Arbeit über Absoluteichung von Mikrophonen durch Vergleich verschiedener Verfahren gezeigt hat.

Bekanntlich beruht die Druckkammereichung darauf, daß in einer abgeschlossenen Kammer, in der sich das zu eichende Mikrophon befindet, durch einen kleinen mittels Exzenter angetriebenen Kolben periodische Druckschwankungen erzeugt werden. Beträgt das vom Kolben verdrängte Wechselvolumen V_x und das Kammervolumen V_0 bei Atmosphärendruck, so ergibt sich der Wechseldruck zu $p = p_0 \frac{V_x}{V_0} \varkappa$, wobei $\varkappa = \frac{C_p}{C_v} = 1{,}41$ das Verhältnis der spez. Wärmen für konst. Druck und konst. Temperatur ist. Es ist dafür zu sorgen, daß der Kompressionsvorgang adiatisch bleibt; die das Kammervolumen abgrenzenden Wandungen müssen daher schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen. Bei der benutzten Kammer (Abb. 11) konnte sich die durch die Kolbenreibung thermisch bedingte Gleichdruckerhöhung über einen Kanal K von 0,6 mm Durchmesser mit der Außenluft ausgleichen. Als Material für die Herstellung der Druckkammer wurde Holz verwendet. Zum Kolbenantrieb diente die Tauchspule und der permanente Magnet eines dynamischen Lautsprechers. Das ganze System wurde mittels einer geeigneten Zentrierspinne (Bronzefeder) auf 50 Hz abgestimmt für den Betrieb aus dem Wechselstromnetz. Durch die geringe Dämpfung der Anordnung war eine genügende Selektion gewährleistet. Der Kolbenweg, der bei den gegebenen Kammerabmessungen nur wenige hundertstel Millimeter für einige μbar beträgt, wurde mit einem geeichten Okularmikroskop abgelesen. Als Strichmarke diente ein dünner Glasfaden G (s. Abb. 11) quer zur Kolbenrichtung.

Für die Eichung des Mikrophones war der Kolbenweg von 0,15 mm ein bequem einzustellender Wert. Mit ihm ergibt sich der vorhandene Wechseldruck zu

$$p = p_0 \frac{V_x}{V_0} \varkappa = 10^6 \cdot 1{,}41 \frac{3 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 780} = 3{,}84 \ \mu\text{bar}$$

V_x = Wechselvolumen = 0,00295 cm³
V_0 = Kammervolumen = 780 cm³
p_0 = Atmosphärendruck = 10^6 μbar
$\varkappa$ = 1,41 (Luft).

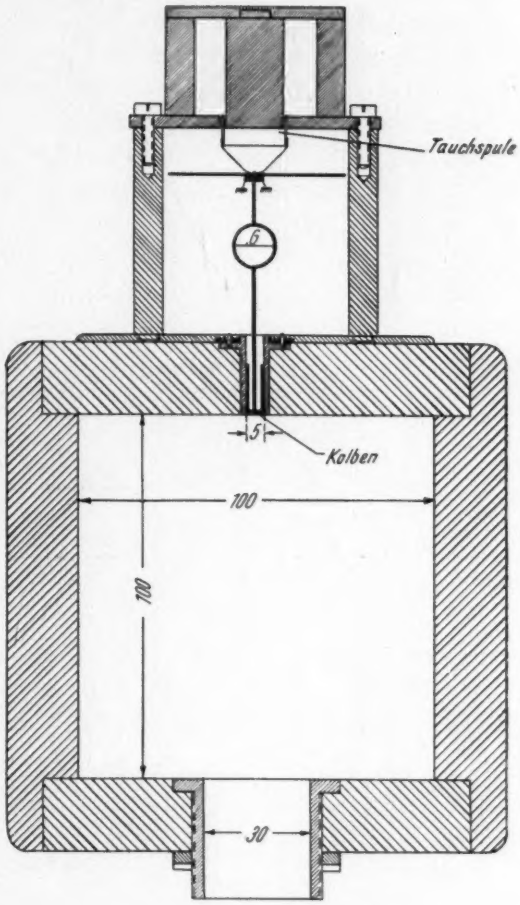

Abb. 11. Druckkammer

Zu dem Schalldruck von $p = 3{,}84$ μbar gehörte ein bestimmter Ausschlag α am Anzeigeinstrument des Schalldruck- bzw. Spannungsmessers. Ein Verdoppeln oder Halbieren dieses Schalldruckes zeigte genaue Proportionalität der gesamten Anordnung. Den Zusammenhang zwischen Schalldruck und Spannung ergab eine einfache Substitution mit einer Wechselspannung von 50 Hz am Eingang des zweistufigen Verstärkers. Nun konnte mit der Eichung des Kopfhörers begonnen werden.

[8]) W. ERNSTHAUSEN, Akust. Z., 4, (1939), H. 1, S. 13.

3. Die Absoluteichung des Meßkopfhörers

Die Frequenzkurve des elektrostatischen Kopfhörers mußte unter möglichst denselben Verhältnissen aufgenommen werden, wie sie am menschlichen Ohr vorhanden sind. Der akustische Widerstand des menschlichen Ohres in Abhängigkeit von der Frequenz wurde durch ein „künstliches Ohr"[9]) nachgebildet,das zur Kopplung von Kopfhörer und Kondensatormikrophon benutzt wurde. Dieses besteht einfach aus einer Nachbildung der im menschlichen Ohre vorhandenen Hohlräume und Kanäle, es stellt also eine akustische Schaltung dar, deren Widerstand ungefähr denselben Verlauf hat, wie der des menschlichen Ohres. Den Eingang dieser Schaltung bildete der Kopfhörer, den Ausgang das Kondensatormikrophon. Zur Aufnahme des Frequenzganges wurde der Schalldruck am Mikrophon konstant gehalten (Abb. 12). Man erhält

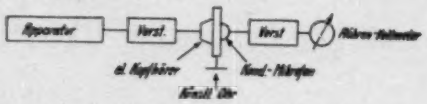

Abb. 12. Schematische Darstellung der Apparatur zur Eichung des elektrost. Kopfhörers

damit den Frequenzgang der Spannung am Hörer für konstanten Schalldruck (Abb. 13). Mit Hilfe dieser Kurve können die für jeden Schalldruck erforderlichen Spannungen abgelesen werden.

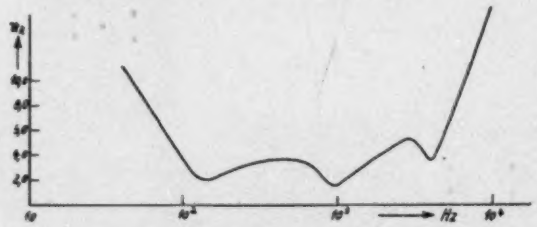

Abb. 13. Frequenzgang der Spannung am elektrost. Kopfhörer für konst. Schalldruck $p = 7$ Dyn/cm²

[9]) Das sog. „harte Ohr" unterscheidet sich von dem „künstlichen Ohr" dadurch, daß die Nachbildung der menschlichen Ohrhohlräume nur durch einen einfachen metallumgebenen Hohlraum vorgenommen wird. Hierdurch entstehen starke Abweichungen von dem Frequenzgang des menschlichen Ohres.

C. Beobachtung und Messung von Klangfarbenänderungen

Die Klangfarbe eines musikalischen Klanges ist, wie eingangs schon erwähnt, durch eine gewisse Form der Luftschwingungen bestimmt oder durch Tonhöhe und Intensität seiner Teiltöne. Danach muß das Ohr also für das Unterscheidungsvermögen der verschiedenen Schwingungsformen einen Mechanismus besitzen, mit dem es imstande ist, eine Schwingung von gegebener Form in ihre Teiltöne zu zerlegen, um den Intensitäten dieser Teiltöne entsprechende Einzelempfindungen auszulösen. Der Eindruck eines Klanges entsteht hiermit durch die Wahrnehmung einer Summe von reinen Tönen, deren Frequenzen in harmonischem Verhältnis zueinander stehen.

Für ein musikalisch geschultes Ohr macht es z. B. keine Schwierigkeiten, in einem vorgegebenen musikalischen Klang einzelne Teiltöne herauszuhören und ihre Lage zum Grundton anzugeben. Besonders stark tritt dieses Heraushören in Erscheinung, wenn man einen Klang erst künstlich aufbaut durch Zufügen einzelner Harmonischen zum Grundton. Das Ohr ist hierbei imstande, mit Leichtigkeit alle beigegebenen Harmonischen einzeln und beliebig lange herauszuhören, falls der Klang nicht längere Zeit unterbrochen wird. Schaltet man das Erinnerungsvermögen aus, indem man die Schallquelle einige Zeit abschaltet (etwa 10 Sek.), so entsteht auch für das geübte Ohr zunächst wieder der Eindruck eines geschlossenen Klangbildes. Solche Beobachtungen wurden auch von NAHRGANG mit der beschriebenen Apparatur gemacht.

Steigert man oder verringert man die Intensität, bei der eine gewisse Klangfarbe wahrgenommen wurde, so ändert sich bei größeren Schalldrücken die Klangfarbe wegen der Nichtlinearität des Ohres. Auch Verdeckungserscheinungen können hierbei eine Rolle spielen. Die infolge der Nichtlinearität des Ohres entstehenden Kombinationstöne ändern je nach der Stärke der sie bildenden Teiltöne die Klangfarbe eines musikalischen Klanges. Es können subjektiv Töne empfunden werden, die in dem ursprünglichen Klange nicht vorhanden

zu sein brauchen (Summationstöne). Bei der Messung subjektiv empfundener Klangfarbenänderungen ist es deshalb erforderlich, den jeweiligen Schalldruck und die jeweilige Grundtonhöhe anzugeben, bei der gemessen wurde. Die folgenden Untersuchungen beschäftigen sich damit, die absolute und relative Teiltonänderung zu messen, durch die eine eben merkliche subjektive Empfindung einer Klangfarbenänderung ausgelöst wird.

Die Zusammensetzung eines Klanges erfolgte so, daß zunächst der Grundton eingestellt und der zur Einstellung des gewählten Schalldruckes zugehörige Drehwinkel des entsprechenden Drehwiderstandes festgestellt wurde. Der für den Grundton eingestellte Schalldruck war durch Ablesung der Kopfhörerspannung bekannt. Entsprechendes wurde mit den übrigen Teiltönen wiederholt. Die für eine Klangfarbenänderung notwendige Änderung des Teiltonschalldruckes wurde mit den bereits erwähnten zusätzlichen Drehwiderständen vorgenommen und der hierzu erforderliche Drehwinkel bei sämtlichen Teiltönen festgestellt. Nach Beendigung der Messung wurde der absolute Betrag jeder Teiltonänderung, nämlich die zusätzliche Schalldruckänderung, einzeln bestimmt.

1. Die Änderung der Klangfarbe durch Änderung der Teiltonschalldruckamplituden

Die Untersuchungen werden an Klängen ausgeführt, die aus acht harmonischen Teiltönen bestehen und deren Teiltonstärken beliebig gewählt sind. Dabei wurde in einem solchen Klange der Schalldruck jeder einzelnen Harmonischen nach zu- bzw. abnehmendem Schalldruck hin stetig solange verändert, bis eine eben merkliche Änderung der Klangfarbe empfunden wurde. Die Messungen wurden der Reihe nach an den Klängen mit den Grundtönen c: 128 Hz, c_1: 256 Hz, c_2: 512 Hz, a_2: 870 Hz und a_3: 1740 Hz durchgeführt. (Abb. 14, 15, 16, 17, 18.) In den Klangspektren bedeuten jeweils die mittleren Punkte die Grundeinstellungen der Teiltöne.

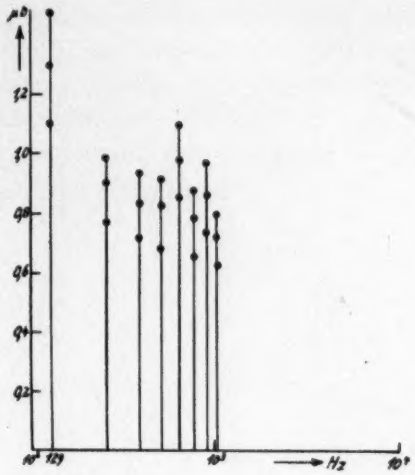

Abb. 14. Eben merkliche Klangfarbenänderung durch Änderung der Schalldruckamplitude eines Teiltones. Grundtonfrequenz = 129 Hz

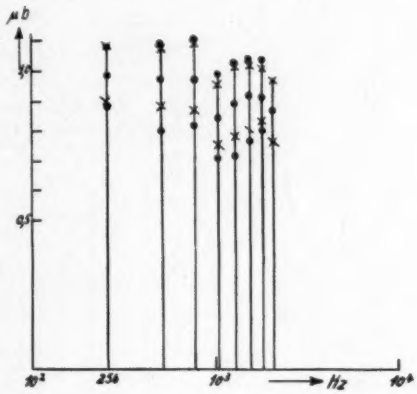

Abb. 15. Grundtonfrequenz = 256 Hz. Vgl. Abb. 14

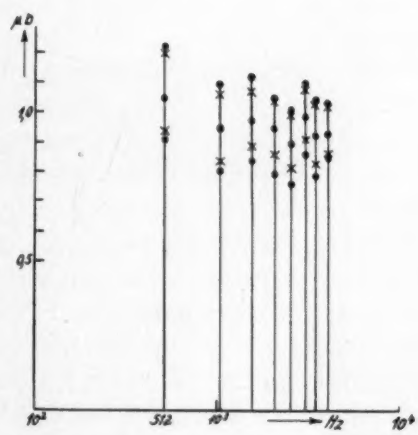

Abb. 16. Grundtonfrequenz = 512 Hz. Vgl. Abb. 14

Bei der Vergrößerung des Schalldruckes eines Teiltones ist dieser leichter aus dem Klange herauszuhören als bei entsprechender Verminderung, da hierdurch die Aufmerksamkeit des Ohres besonders auf diesen Ton gelenkt

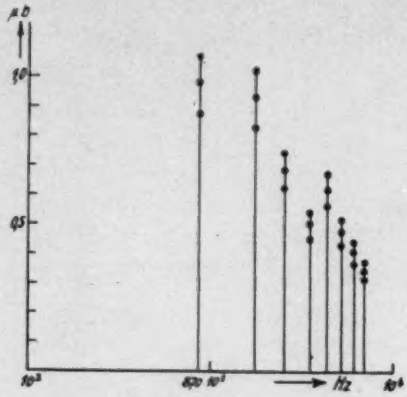

Abb. 17. Grundfrequenz = 870 Hz. Vgl. Abb. 14

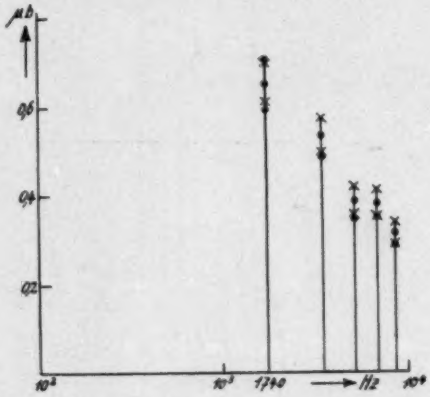

Abb. 18. Grundtonfrequenz = 1740 Hz. Vgl. Abb. 14

wird. Das zeigt sich besonders deutlich in Abb. 14.

Wenn man den Schalldruck eines Teiltones kleiner werden läßt, so sollte man hiernach erwarten, daß durch diese Verringerung dieser Teilton ebenfalls besonders merklich wird und daß man die Änderung demnach als ein Leiserwerden dieses Teiltones empfindet. Das trifft auch für den Grundton und den höchsten der im Klange vorhandenen Teiltöne, bei den vorliegenden Versuchen dem 8. Teilton, wirklich zu. Bei den dazwischen liegenden Teiltönen wurden aber ganz andere Beobachtungen gemacht. Der Grund für das abweichende Verhalten des Grundtones und des höchsten Teiltones ist wohl darin zu suchen, daß die Verdeckung dieser beiden Teiltöne durch benachbarte Töne nicht so groß ist als bei den übrigen Teiltönen. Der Schalldruck der übrigen Teiltöne mußte um einen größeren Betrag vermindert werden, bis eine Klangfarbenänderung wahrgenommen werden konnte. Die Änderung der Klangfarbe wurde aber hier nicht als ein Leiserwerden des betreffenden Teiltones empfunden. Es trat hier vielmehr durchweg eine sehr merkwürdige Erscheinung auf: Bei der Verminderung des Schalldruckes eines solchen Teiltones trat als eben merkliche Klangfarbenänderung immer der benachbarte nächst höhere Teilton stärker hervor. Um festzustellen, daß es sich hierbei nicht um eine psychologische Täuschung handelt, wurde zunächst ein Klang nach Abb. 19a eingestellt. In diesem Klange wurde der Schalldruck der 4. Harmonischen vermindert und dabei als Klangfarbenänderung ein Heraushören der 5. Harmonischen festgestellt. Danach wurde der Klang einen Augenblick abgeschaltet und der Schalldruck der 4. Harmonischen während des Abschaltens über den früheren Ausgangswert *a* erheblich erhöht (Abb. 19a, Punkt *a'*), so daß jetzt die 4. Harmonische in dem Klange deutlich herauszuhören war. Die eben beschriebene Messung wurde sodann wiederholt, aber es zeigte sich bei der Verminderung des Schalldruckes der 4. Harmonischen wiederum als Empfindung einer Klangfarbenänderung das stärkere Hervortreten der 5. Harmonischen, aber keine Schwächung der 4.

Die Bestätigung dieser Erscheinung zeigen noch zwei weitere Versuche mit demselben Klange. Zunächst wurde in Abb. 19b während einer kurzen Unterbrechung des Klanges der Schalldruck der 3. Harmonischen über den Ausgangswert erhöht und danach zur Beobachtung der Klangfarbenänderung der Schalldruck der 4. vermindert. Man sollte erwarten, daß nunmehr bei der Verminderung des Schalldruckes der 4. Harmonischen als Klangfarbenänderung ein Lauterwerden der 3. wahrgenommen würde; aber auch in diesem Falle wurde wieder der

nächst höhere 5. Teilton als eben merkliche Änderung der Klangfarbe wahrgenommen. Der Schalldruck der 4. Harmonischen mußte bei diesem Versuch etwas mehr vermindert werden als bei dem Versuch nach Abb. 19a, bis das Hervortreten der 5. Harmonischen die Änderung der Klangfarbe andeutete. Es rührt dies daher, daß die 4. Harmonische durch den erhöhten Schalldruck der 3. etwas mehr verdeckt war. In demselben Klange wurde zuletzt noch der Schalldruck der 5. Harmonischen über den Ausgangswert erhöht (Abb. 19c) und zur Beobachtung der der 3. vermindert. Die Erwartung, hier ein Hervortreten der viel lauteren 5. Harmonischen als Änderung der Klangfarbe zu empfinden, traf nicht zu, es war auch hier als Klangfarbenänderung wiederum ein Stärkerwerden der nächst höheren 4. Harmonischen zu beobachten.

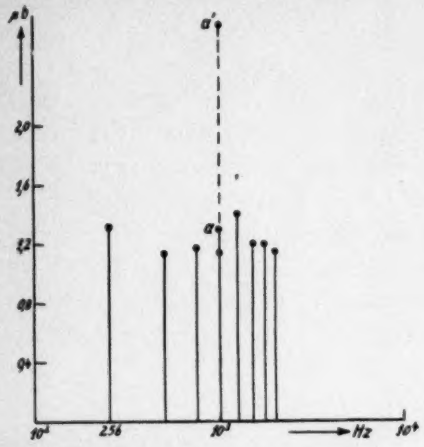

Abb. 19a. Subjektive Empfindung der 5. Harmonischen als eben merkliche Klangfarbenänderung bei Verminderung des Schalldruckes der 4. Harmonischen vom Ausgangswert a bzw. a' aus

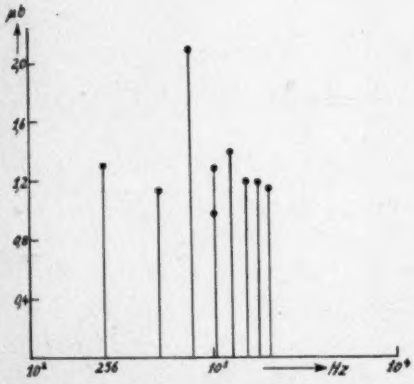

Abb. 19b. Erhöhung des Schalldruckes der 3. Harmonischen in einer kurzen Schaltpause über den Ausgangswert der Abb. 19a. Subjektive Empfindung der 5. Harmonischen als eben merkliche Klangfarbenänderung bei Verminderung des Schalldruckes der 4. Harmonischen

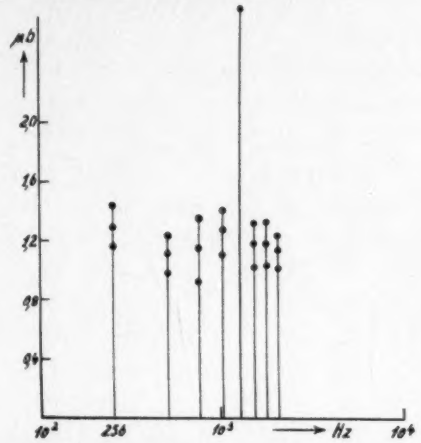

Abb. 19c. Erhöhung des Schalldruckes der 5. Harmonischen über den Ausgangswert der Abb. 19a. Subjektive Empfindung der 4. Harmonischen bei der Verminderung des Schalldruckes der 3. Harmonischen als eben merkliche Klangfarbenänderung

Man kann zur Erklärung dieser Erscheinung wohl die Tatsache heranziehen, daß für die hier vorkommenden Tonintervalle die Verdeckung eines hohen Tones durch einen tiefen Ton größer ist als die Verdeckung eines tiefen Tones durch einen hohen. Bei dem Klange nach Abb. 19b war z. B. der 3. Teilton nach dem Einschalten des Klanges stark herauszuhören, aber bei der Verminderung der 4. Teiltonamplitude wurde nicht ein Leiserwerden des 4. Teiltones wahrgenommen, auch nicht ein Lauterwerden des 3., sondern es trat, wie erwähnt, der nächst höhere 5. Teilton als Empfindung einer Klangfarbenänderung in Erscheinung. Daß hierbei der für die Verminderung des 4. Teiltonschalldruckes zu ändernde Betrag größer sein mußte, bis eine Klangfarbenänderung durch Hervortreten des 5. Teiltones eintrat, als beim Klange nach Abb. 19a kann dadurch erklärt werden, daß der 4. Teilton durch das Erhöhen der Amplitude des 3. Teiltones mehr verdeckt wurde.

2. Subjektive Klangfarbenempfindung beim Auslöschen eines Teiltones

Beim völligen Auslöschen eines Teiltones in einem Klange treten gegenüber den oben erwähnten Eindrücken noch andere in Erscheinung. Der Versuch mit einem Klange ähnlich Abb. 19a zeigt, daß zwar der nächst höhere Teilton sich wiederum stärker hervorhebt, aber gleichzeitig die Klangfarbe dunkler wird. Dies gilt für das Verschwinden eines der niederen Teiltone. Wenn der 4. Teilton zum Verschwinden gebracht wird, ist das Dunklerwerden der Klangfarbe kaum mehr festzustellen. Beim Auslöschen des 5. Teiltones wird sogar ein Hellerwerden der Klangfarbe beobachtet. Wird endlich der 6. oder 7. Teilton zum Verschwinden gebracht, so erscheint die Klangfarbe nur noch dadurch verändert, daß sie heller wird bzw. der 8. Teilton wie „isoliert" in Erscheinung tritt.

Bei den Klängen mit den Grundtönen c_1: 256 Hz, c_2: 512 Hz und a_3: 1740 Hz (Abb. 15, 16, 18) sind durch kleine Kreuze noch die Werte für die Unterschiedsschwellen der Intensität der betreffenden Töne angegeben, wenn sie allein eingestellt werden. Wie man sieht, liegen die Werte für die Klangfarbenänderung etwas über den Werten für die Unterschiedsschwellen der Intensitäten und fallen bei höheren Frequenzen bei der Vergrößerung des Schalldruckes ungefähr mit diesem zusammen.

3. Unterschiedsschwelle der Intensität und Unterschiedsschwelle der Klangfarbenänderung

Die bisher angeführten Messungen wurden alle bei einem mittleren Schalldruck von etwa 1 μbar ausgeführt. Nach dem Vorhergesagten, wonach das Ohr einen Klang in seine Teiltöne zerlegt, kann man erwarten, daß auch hier das WEBER-FECHNERsche Gesetz gilt. Es stellt die Beziehung dar zwischen dem von außen auf das Ohr einwirkenden objektiven Schallreiz und der damit ausgelösten subjektiven Schallempfindung. In der Differentialform lautet das Gesetz: $\delta L = C\frac{dE}{E}$. Darin bedeuten δL die eben merkliche Lautstärkenänderung, C eine konstante, E die vorhandene Reizstärke und dE der zugehörige Reizzuwachs. Außerdem ist die Annahme gemacht, daß die eben merkliche Lautstärkenänderung unabhängig ist von Tonhöhe und Intensität. Eingehende Untersuchungen wurden in diesem Zusammenhang erst von M. WIEN angestellt[10]) und in einer neueren Arbeit von V. O. KNUDSEN[11]). KNUDSEN zeigt in seinen Messungen mit reinen Tönen, daß das WEBER-FECHNERsche Gesetz nur in einem gewissen Intensitätsbereich Geltung hat. Ähnliches wurde in den folgenden Untersuchungen auch für die Klangfarbenänderung festgestellt.

Abb. 20 zeigt einen Klang mit dem Grundton $c_1 = 256$ Hz, in der Nähe der Hörschwelle

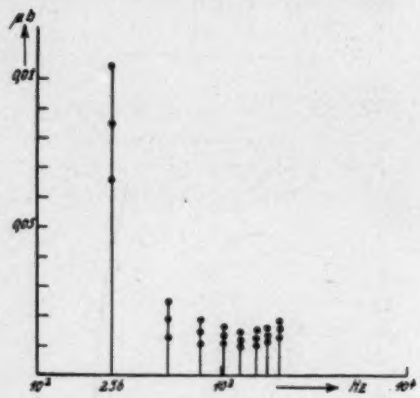

Abb. 20. Eben merkliche Klangfarbenänderung durch Änderung der Teiltonamplituden in der Nähe der Hörschwelle gemessen. Grundtonfrequenz = 256 Hz

gemessen. Zum Unterschied von KNUDSEN sollte dabei festgestellt werden, bei welcher relativen Intensitätsänderung $\frac{dE}{E}$ eines Teiltones eine Klangfarbenänderung des gesamten Klanges eintritt. Es zeigt sich hierbei, daß ganz ähnliche Werte wie die von KNUDSEN erhalten wurden. Der Wert $\frac{dE}{E}$ beträgt für die Unterschiedsschwelle sowohl bei reinen Tönen wie für die Klangfarbenänderung etwa $\frac{dE}{E}=0{,}3$. Steigert man vom Schwellwert aus beginnend allmählich den Schalldruck, so verlaufen die Werte $\frac{dE}{E}$ für die Klangfarbenänderung ähnlich

[10]) M. WIEN, Ann. d. Phys. 39 (1912), S. 251.
[11]) V. O. KNUDSEN, Phys. Rev. 21 (1923), S. 84.

wie die KNUDSEN-Kurven. In der Nähe der Hörschwelle liegen nach KNUDSEN für einfache Töne die Werte für $\frac{dE}{E}$ bei ungefähr $\frac{dE}{E} = 0{,}3$, mit zunehmendem Schalldruck nähern sie sich dem Werte $\frac{dE}{E} = 0{,}1$. In den vorliegenden Messungen für reine Töne wurde hierfür als Grenzwert etwa $\frac{dE}{E} = 0{,}08$ ermittelt (Abb. 21). Zum Vergleich mit den gewonnenen

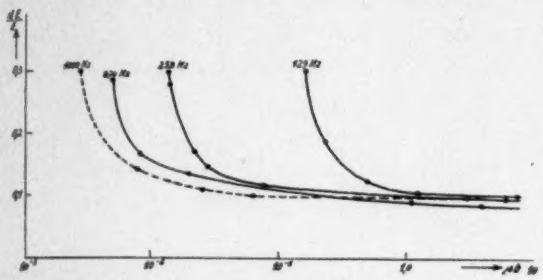

Abb. 21. Unterschiedsschwellen der Intensität in Abhängigkeit von der Schalldruckamplitude bei verschiedenen Tonhöhen

Meßergebnissen ist in Abb. 21 noch eine KNUDSEN-Kurve für einen Ton von 1000 Hz gestrichelt eingezeichnet.

Wie die Untersuchungen zeigen, weichen die Werte $\frac{dE}{E}$ sowohl für die Klangfarbenänderung als auch für die Unterschiedsschwelle der Intensität reiner Töne nur sehr wenig voneinander ab. Man kann hiernach erwarten, daß auch für die Klangfarbenänderung das WEBER-FECHNERsche Gesetz gilt.

In diesem Zusammenhang ist es noch wertvoll, die Unterschiedsschwelle der Intensität zu ermitteln, die sich ergibt, wenn die Schalldruckamplituden mehrerer Töne gleichzeitig geändert werden. Diese Messung wurde zunächst mit zwei harmonisch zueinanderliegenden Tönen (2. und 3. Harmonische) gleicher Schalldruckamplituden bei einem Schalldruck von $p = 2\,\mu$bar vorgenommen. Für die Unterschiedsschwelle der Intensität ergab sich hierbei sowohl bei der Vergrößerung als auch bei der Verminderung des Schalldruckes ein Wert $\frac{dE}{E} = 0{,}053$. Um hieraus auf die gleiche Wirkung des objektiven Schallreizes zu gelangen, die ein einzelner reiner Ton bei entsprechendem Schalldruck auslösen würde, muß man den erhaltenen Wert $\frac{dE}{E}$ mit $\sqrt{2}$ multiplizieren und erhält dafür den Wert $\frac{dE}{E} = 0{,}075$. Vergleicht man diesen Wert mit dem aus den KNUDSEN-Kurven für reine Töne bei entsprechendem Schalldruck erhaltenen Wert von $\frac{dE}{E} = 0{,}08$, so zeigen die Werte gute Übereinstimmung. Bei der Wiederholung dieses Versuches mit vier Tönen gleicher Schalldruckamplituden ergibt sich nach derselben Umrechnung ein Wert $\frac{dE}{E} = 0{,}078$. Wie man sieht, wird also durch diese Maßnahme die Unterschiedsschwelle der Intensität nicht geändert.

4. Einfluß subjektiver Kombinationstöne auf die Klangfarbenänderung

Im Anschluß an diese Versuche wurden die obenerwähnten Messungen von Klangfarbenänderungen auch bei verschiedenen Lautstärken wiederholt. Hierzu wurde zunächst ein Klang nach Abb. 22 eingestellt mit einer mittleren Teilton-Druckamplitude von etwa 4 μbar und in diesem wie bisher die Klangfarbenänderung ermittelt. In der Abb. 22 sind für einen mittleren Schalldruck von 4 μbar die Amplitudenpunkte der acht eingestellten Teiltöne durch eine stark ausgezogene Kurve *a* miteinander verbunden. Die darüber liegende gestrichelte Kurve *b* zeigt die Änderungen dE der einzelnen Teiltonamplituden für zunehmenden Schalldruck bis zur Wahrnehmung einer Klangfarbenänderung. Die unter der Kurve *a* liegende strichpunktierte Kurve *c* zeigt die entsprechende Änderung dE bei der Verminderung des Schalldruckes. Wie man sieht, zeigen die Werte $\frac{dE}{E}$ auch bei einem Schalldruck von 4 μbar noch keine Abweichungen von dem für höhere Schalldrucke gültigen Wert 0,1. Bei einem mittleren Schalldruck von etwa 16 μbar beginnen aber Abweichungen aufzutreten, und man sieht aus Abb. 22 Kurve *d*, daß die Unterschiedsschwelle einer Teiltonänderung bei der Verringerung des Teilton-Schalldruckes größer wird. Es rührt dies daher, daß infolge der Nicht-

linearität des Ohres subjektive Kombinationstöne auftreten. Diese Kombinationstöne, die durch die in dem Klange vorhandenen höheren Teiltöne gebildet werden und von deren Schalldruck abhängen, können wiederum nur Harmonische zum Grundton sein. Auf diese Weise werden die tieferen Teiltöne des Klanges subjektiv verstärkt, vor allem als Differenzton 1. Ordnung, so daß mit der Vergrößerung des Schalldruckes noch gleichzeitig ein Dunklerwerden der Klangfarbe eintritt. Da die Kurven gleicher Lautstärke bei dem eingestellten Schalldruck nahezu parallel verlaufen, kann das Dunklerwerden der Klangfarbe nur durch die Bildung subjektiver Kombinationstöne erklärt werden. Für den Grundton, den 2. und 3. Teilton sind die Teiltonänderungen am größten; vom 4. bis 8. Teilton gehen sie etwa in die üblichen Werte über. Für die Änderung der Klangfarbe bei Vergrößerung der Teilton-Schalldruckamplituden war sowohl für den mittleren Schalldruck von 4 μbar als auch für den zuletzt eingestellten Schalldruck von 16 μbar die gleiche relative Änderung der Teiltonamplituden erforderlich, so daß auch hierfür die Kurve *b* gilt.

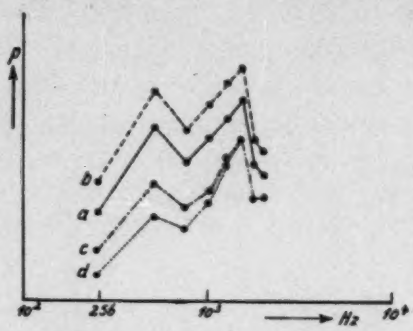

Abb. 22. Eben merkliche Klangfarbenänderung durch Änderung der Schalldruckamplituden einzelner Teiltöne.
Kurve a = Ausgangseinstellung der Teiltonamplituden für einen mittleren Schalldruck von $p = 4$ μb bzw. $p = 16$ μb.
Kurve b = Eben merkliche Änderung der Klangfarbe bei der Vergrößerung des Teiltonschalldruckes für $p = 4$ μb und $p = 16$ μb.
Kurve c = Eben merkliche Änderung der Klangfarbe bei der Verminderung des Teiltonschalldruckes für p = 4 μb.
Kurve d = Desgl. für $p = 16$ μb. Zunahme der Unterschiedsschwelle für die Klangfarbenänderung durch Bildung subjektiver Kombinationstöne

Nähere Untersuchungen über das Zustandekommen von subjektiven Kombinationstönen wurden von H. FLETCHER[12]) mit einem Versuchsklange angestellt. Mit Hilfe von Röhrensummern konnte FLETCHER einen aus zehn Teiltönen bestehenden Klang bilden. Der absolute Schalldruck betrug bei seinen Messungen etwa 100 μbar, der Grundton hatte eine Frequenz von 100 Hz. Dabei zeigte sich, daß infolge der Nichtlinearität des Ohres die durch die höheren Teiltöne gebildeten subjektiven Kombinationstöne so groß waren, daß die ersten vier Teiltöne aus dem Klange entfernt werden konnten, ohne die Klangfarbe hierdurch merklich zu ändern. Versuche mit Schalldrucken bis zu diesen Werten hinauf konnten mit dem benutzten elektrostatischen Kopfhörer leider nicht verzerrungsfrei erreicht werden. Man sieht aber schon aus der Messung bei einem Schalldruck von 16 μbar deutlich den Einfluß durch subjektive Kombinationstonbildung auf die Klangfarbe.

5. Einfluß des Erinnerungsvermögens auf die Klangfarbe

In den bisherigen Versuchen wurden in jedem Klange, wie eingangs schon erwähnt, der Schalldruck eines Teiltones stetig geändert bis zur Wahrnehmung einer Klangfarbenänderung. Im folgenden werden einige Versuche beschrieben, in denen die Schalldruckänderungen unter kurzzeitigem Abschalten des Klanges in den Schaltpausen vorgenommen wurden, um festzustellen, wie sich hierdurch die Werte für die Klangfarbenunterschiede ändern. Es wurde dabei so vorgegangen, daß vor der Schalldruckänderung eines Teiltones der ganze Klang durch Drücken einer Taste kurz ausgeschaltet wurde. Während dieser Schaltpause wurde der Schalldruck eines Teiltones geändert und danach die Taste wieder losgelassen. Die hierbei eingelegte Pause betrug etwa eine halbe Sekunde. Dieses Ändern des Schalldruckes wurde solange fortgesetzt, bis der Wert für die Wahrnehmung einer Klangfarbenänderung eingegrenzt war. Aus der

[12]) H. FLETCHER, Phys. Rev. 23 (1924), S. 436.

Abb. 23 sieht man, daß selbst für diese kurze Zeit der Unterbrechung schon eine merklich größere Erhöhung bzw. Verminderung des Schalldruckes erforderlich war gegenüber den früheren Versuchen mit stetiger Schalldruckänderung, um eine Änderung der Klangfarbe hervorzurufen.

Will man Instrumentenklänge miteinander vergleichen, so ist es von Interesse, zu wissen, wie lange ein einmal erhaltener Klangeindruck in Erinnerung bleibt. Um dies feststellen zu können, wurde das aus einer Analyse bekannte Klangspektrum eines Geigenklanges benutzt, und zwar wurde ein Klang mit dem Grundton c_3: 512 Hz nachgebildet (Abb. 24). Die Nachbildung dieses Klanges war insofern keine genaue Reproduktion des Originals als in der Analyse noch der mit der Apparatur nicht einstellbare 9. und 10. Teilton mit geringer Amplitude enthalten war; außerdem war die Lautstärke bzw. der Schalldruck, bei dem der Geigenklang analysiert wurde, nicht bekannt. Für den vorliegenden Versuch brauchte aber auf eine besondere Genauigkeit der Reproduktion kein Wert gelegt zu werden. Hier interessierte vor allem, wie weit es gelingt, die Klangfarbenänderung zurückzugewinnen, wenn die Schallquelle einige Sekunden abgeschaltet wird und die Teiltonamplituden während der Schaltpause geändert werden. Das Ergebnis ist folgendes: Nach einer Schaltpause von 2 Sekunden ist diese Wiederherstellung möglich, wobei die höheren Teiltöne nicht mehr als etwa 30% vom ursprünglichen Werte abweichen. Nach einer Schaltpause von etwa 3—5 Sekunden können die höheren Teiltöne teilweise über 100% geändert werden, ohne daß hierdurch die empfundene Klangfarbe merklich geändert wird. Der Versuch zeigt also, daß Klänge von Instrumenten selbst dann noch als gleichklingend empfunden werden können, wenn die Teiltonamplituden schon wesentlich voneinander abweichen; außerdem sind hieraus die großen Schwierigkeiten erkennbar, die dann auftreten, wenn ein synthetisch hergestellter Instrumentenklang beurteilt und gegebenenfalls durch Änderung der Teiltöne „verbessert" werden soll.

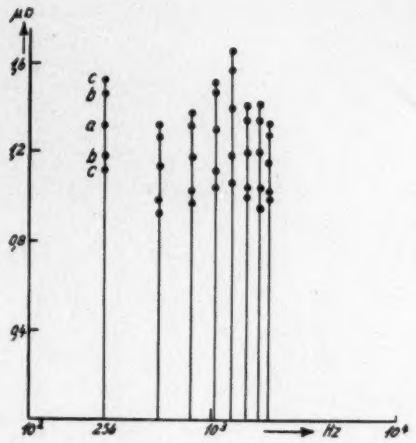

Abb. 23. Eben merkliche Klangfarbenänderung durch Änderung der Teiltonamplituden während einer kurzen Unterbrechung des Klanges.

Mittlere Punkte a = Ausgangseinstellungen der Teiltonamplituden.

b = Unterschiedswelle für die Klangfarbenänderung bei stetiger Änderung der Teiltonamplituden.

c = Desgl. für die Änderung der Teiltonamplituden während einer Unterbrechung des Klanges von 2 Sekunden

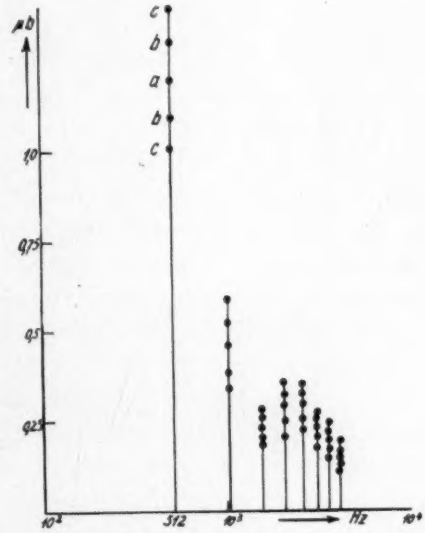

Abb. 24. Amplitudenspektrum eines Geigenklanges, mittlere Punkte a.

Punkte b: Unterschiedswelle für die eben merkliche Klangfarbenänderung bei stetiger Änderung der Teiltonamplituden.

c: Desgl. für die Änderung der Teiltonamplituden während einer Unterbrechung des Klanges von etwa 2 Sekunden

Zusammenfassung

Es wird über neuere Ergebnisse zur Frage der Klangsynthese berichtet. Mit einer Apparatur zur Erzeugung harmonischer Tonfrequenzen wird die Klangfarbenänderung durch Änderung der Schalldruckamplituden einzelner Teiltöne beobachtet und gemessen. Insbesondere wird dabei festgestellt, daß die Änderung eines Teiltones auch einen Einfluß auf die subjektive Empfindung des nächst höheren Teiltones haben kann. Weiterhin wird der Einfluß subjektiver Kombinationstöne auf die Unterschiedsschwelle der Klangfarbenänderung bei Änderung der Gesamtlautstärke eines Klanges untersucht. Es zeigt sich, daß bei sehr großen Lautstärken starke Abweichungen von dem für mittlere Schalldrucke gültigen Wert $\frac{dE}{E} = 0{,}1$ auftreten. In der Nähe der Hörschwelle wird die relative Intensitätsänderung $\frac{dE}{E}$ sowohl für die Unterschiedsschwelle der Intensität als auch für die Klangfarbenänderung gemessen und in Übereinstimmung gefunden mit den Ergebnissen von KNUDSEN für reine Töne. Im Rahmen dieser Arbeit wird außerdem über Untersuchungen an Mikrophonen berichtet.

Die vorliegende Arbeit wurde ausgeführt am Lehrstuhl für theoretische Elektrotechnik und Schwachstromtechnik der T. H. Karlsruhe. Meinem hochverehrten Chef und Lehrer, Herrn Professor Dr. H. BACKHAUS, bin ich für die Anregung zu dieser Arbeit und für seine Anteilnahme an dem Fortgang zu großem Dank verpflichtet.

Ich danke ferner der Helmholtzgesellschaft für die Überlassung eines Oszillographen.

(Eingegangen am 25. Februar 1941.)

Zur Frage der Beeinflussung des Toneinsatzes bei der Orgel

Mitteilung aus dem Institut für Hochfrequenztechnik und Elektroakustik der Technischen Hochschule Hannover

Von Oskar Vierling und Fritz Sennheiser

(Mit 3 Textabbildungen)

Bei den alten Instrumenten hatte man noch weitgehend eine innige Verbindung zwischen Spieler und Instrument, wobei wir als Instrument den eigentlichen Klangerzeuger betrachten. Sogar bei Tasteninstrumenten, wie dem Klavichord, ist es dem Spieler möglich, den Klang zu beeinflussen. Die Taste steht hier über die Tangente in direkter Verbindung mit der Saite, die durch ihre Schwingungen den Ton erzeugt. Mit der Weiterentwicklung der Instrumente wurden die technischen Fortschritte nicht nur dazu benutzt, den eigentlichen Klangerzeuger zu verbessern, sondern auch dazu, ein einfacheres Spiel oder eine Vergrößerung des Tonumfanges zu erreichen. So können wir heute die Instrumente nach dem Grad der Beeinflußbarkeit der verschiedenen Faktoren des Klanges durch den Spieler abstufen, angefangen bei den Streich- und Blasinstrumenten bis zu den Tasteninstrumenten. Bei den Streichinstrumenten kann der Spieler heute noch seine Auffassung bis in alle Feinheiten voll zum Ausdruck bringen, da er hier außer der Tonhöhe und der Lautstärke auch das An- und Abklingen des Tones umfassend beherrscht. Auch die Blasinstrumente erlauben dem Spieler eine weitgehende Beeinflussung des Klanges. Es erscheint uns heute als erstrebenswertes Ziel, Instrumente zu besitzen, bei denen die Klanggestaltung ganz in die Hände des Spielers gelegt ist; allerdings war dies nicht in allen Stilepochen das Ideal. So wollte man im Barock eine möglichst unpersönliche Klanggestaltung und hat damals Instrumente bevorzugt, bei denen alle wesentlichen Faktoren, wie Klangfarbe und Toneinsatz, möglichst auch die Laut-

stärke, fest gegeben waren. Aus dieser Einstellung heraus ist z. B. der Bau des Krummhorns zu verstehen, bei dem das Rohrblatt in einer besonderen Windkapsel zum Schwingen erregt wird und dadurch der Beeinflussung durch den Spieler weitgehend entzogen ist.

Während man bei den Streich- und Blasinstrumenten einen durch ihren Bau bedingten engen Kontakt zwischen Spieler und Klang hat, ist dies bei den Tasteninstrumenten anders. Schon durch die räumlich große Ausdehnung dieser Instrumente ist es bedingt, daß der Musiker nicht in so unmittelbarer Fühlung mit der Tongebung stehen kann. Er muß sich vielmehr die Zwischenschaltung eines Übertragungsmechanismus gefallen lassen, der die Bewegung der Tasten an den eigentlichen klangerzeugenden Teilen des Instrumentes — den Saiten beim Klavier und den Pfeifen bei der Orgel —, wirksam werden läßt. Dieses Übertragungsglied — die „Traktur" —, das den Erfordernissen der einzelnen Instrumente entsprechend ganz verschieden ausgebildet ist, soll in der vorliegenden Arbeit Gegenstand der Untersuchungen sein.

Bei der Orgel hat dies Zwischenglied — vom Spieltisch bis zu den Windladen — von der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ab verschiedene Wandlungen erfahren und sich die jeweiligen technischen Fortschritte nutzbar gemacht. Dabei kann man heute noch die verschiedensten Arten nebeneinander im Betrieb vorfinden, vor allem wohl darum, weil noch nicht genügend objektive Versuche über die Zweckmäßigkeit der einzelnen Systeme gemacht wurden. Drei große Gruppen der Orgelsteuerung haben sich herausgebildet:

1. Die mechanische Traktur, bei der die Bewegung der Tasten durch Abstrakte, Winkel und Wellen bis zu einem gewissen Grade parallel auf die Ventile übertragen wird und sie öffnet und schließt. Dieser mechanischen Traktur steht die jahrhundertelange Erfahrung handwerklicher Holzbearbeitungskunst zur Seite. Zwar hat Holz den großen Vorteil der leichten Bearbeitbarkeit, aber für diesen Verwendungszweck den Nachteil, daß es kein absolut formstarres, totes Material ist, sondern durch Temperatur- und Witterungseinflüsse in seinen Abmessungen und Festigkeitseigenschaften verändert wird. Soll aus irgendwelchen Gründen heute eine Orgel mit einer mechanischen Traktur ausgerüstet werden, so wäre zu überlegen, ob man nicht mehr als bisher Leichtmetall und Kunstharzprodukte verwendet, die einen vollkommen witterungsunabhängigen Aufbau gewährleisten würden.

2. Die pneumatische Steuerung, bei der die Verbindung zwischen Taste und Ventil über verschiedenartige Druckluftsysteme[1]) hergestellt wird.

3. Die elektrische Steuerung, wo mit Kontakten an den Tasten über Stromkreise und Relais die Ventile betätigt werden.

Die rein elektrische Steuerung hat man heute allgemein verlassen und verwendet meist eine Kombination von elektrischen und pneumatischen Schaltmitteln. Obgleich diese elektrisch-pneumatische Steuerung in ihren Möglichkeiten für den Spieler heute schon alle anderen Trakturen überragt, steht sie doch erst am Anfang ihrer Entwicklung. Wenn heutzutage bei der elektrischen Traktur über Störungen geklagt wird, dann ist dies fast ausschließlich auf den ungenügenden Entwicklungsstand zurückzuführen. Es ist aus diesem Grunde bedauerlich, daß die Fernmeldetechnik sich noch so wenig dieses Gebietes der Orgelsteuerungen angenommen und technisch einwandfreie, voll ausgereifte Konstruktionen geschaffen hat.

Immer wieder taucht nun — besonders bei der Instandsetzung alter Orgeln — die Frage auf, ob man die mechanische Traktur durch eine elektrische Steuerung ersetzen solle, oder ob dies im Interesse der Klanggebung und Spielart vermieden werden müsse. Es ist nämlich der Gedanke sehr naheliegend, in der direkten Verbindung zwischen Taste und Ventil bei der mechanischen Traktur ein Mittel zu sehen, den Klang, besonders den Anklingvorgang der Pfeifen durch die Tastenbewegung beeinflussen zu können. Bei der heute üblichen elektrischen Steuerung geht dies offensichtlich

[1]) In der Fachsprache des Orgelbaus mit „Zu- und Abstromsystemen" bezeichnet.

nicht; denn wenn durch den Tastendruck der Kontakt in dem Relaisstromkreis geschlossen wird, ist die Bewegung des Relaisankers, der mittelbar oder unmittelbar das Ventil betätigt, nur noch von unveränderlichen elektrischen und mechanischen Daten abhängig.

Diesem Vorteil der direkten Verbindung zwischen Taste und Ventil bei der mechanischen Traktur stehen allerdings auch Nachteile gegenüber. Besonders zu erwähnen sind die Empfindlichkeit gegen Witterungseinflüsse, die kürzere Gebrauchszeit bei Verwendung von Holz als Baumaterial und bei größeren Orgeln die schwere Spielart solcher damit ausgerüsteter Manuale. Es bedeutet für den Spieler wirklich eine körperliche Anstrengung, längere Zeit hintereinander auf einer mechanischen Traktur bei Werken über 30 Register spielen zu müssen. Aber auch diese Nachteile würde man sicher noch in Kauf nehmen, wenn der in Frage stehende Vorteil der Klangbeeinflussung bestände, denn das Primäre bei der Beurteilung einer Orgel ist doch nun einmal die Schönheit ihres Klanges und ihrer Ansprache, auch wenn diese unter kleinen Opfern erkauft werden müßte. Die Diskussion über diese Frage mußte solange unfruchtbar bleiben, als sie nur auf subjektive Wahrnehmungen gegründet war, die oft einer ungewollten Täuschung unterliegen. Es mußte vielmehr der objektive Nachweis erbracht werden, ob bei der mechanischen Traktur eine Beeinflussung des Anklingvorganges durch den Spieler möglich ist oder nicht. Zu diesem Zweck wurden von den Verfassern im Rahmen anderer Untersuchungen die nachfolgenden Versuche an einer Orgel mit mechanischer Traktur[2]) vorgenommen und die hierbei gewonnenen Ergebnisse an anderen Orgeln nachgeprüft.

Für die Messungen wurde das Verfahren der Oktavsieb-Oszillographie benutzt, bei dem der zu untersuchende Klang mit einem Kondensatormikrophon aufgenommen wird und die sich ergebenden elektrischen Schwingungen hinter Oktavfiltern durch Oszillographenschleifen aufgezeichnet werden. Im vorliegenden Falle bereitete die Anwendung dieses Verfahrens insofern etwas Schwierigkeiten, als die umfangreiche Meßapparatur zu der Orgel in die Kirche transportiert wurde. Man hätte auch den Weg gehen können, die Klänge erst durch Tonaufzeichnungsverfahren (Schallplatte, Magnetophon, usw.) an Ort und Stelle aufzunehmen und sie dann im Laboratorium durch die Oktavsieb-Apparatur zu analysieren. Von dieser Möglichkeit wurde aber Abstand genommen, da die Zwischenschaltung von Tonaufzeichnungs- und Wiedergabegeräten die Gefahr von Fehlmessungen durch Nichtlinearität, Frequenzgang usw. der betreffenden Apparaturen in sich birgt. Über das hier benutzte Verfahren der Oktavsieb-Oszillographie (Abb. 1) ist an

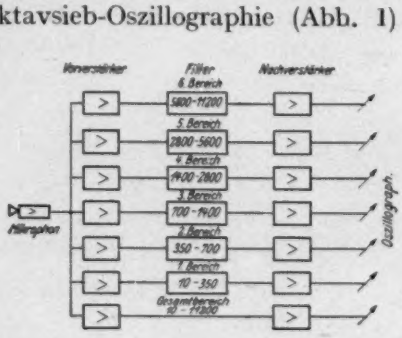

Abb. 1. Prinzipschaltung der Meßeinrichtung

anderer Stelle[3]) schon ausführlich berichtet worden, so daß nur das Prinzip soweit kurz wiederholt werden soll, als es zum Verständnis der später gebrachten Oszillogramme notwendig erscheint.

Die durch das Kondensatormikrophon in gleichartige elektrische Schwingungen umgewandelten Klänge gelangen über sieben gleiche Vorverstärker zu Filtern, die den insgesamt gemessenen Bereich von 10—11 200 Hz im Oktavverhältnis mit den in Abb. 1 angegebenen Grenzen unterteilen. Hinter diesen Filtern hat man also den unbeeinflußten Gesamtklang und dann noch außerdem diesen Klang in seine einzelnen Teiltongebiete zerlegt, die dann alle über sieben Nachverstärker von den sieben Oszillographenschleifen auf einem Oszillogramm aufgezeichnet werden. Durch einen Zeitschreiber wird

[2]) Marktkirche, Hannover (Orgelbau Gebr. Meyer).

[3]) O. Vierling und F. Sennheiser, Akust. Z. 2 (1937), S. 93.

gleichzeitig auf den Oszillogrammen noch eine Zeitmarke (100 Hz) mitgeschrieben, um Aussagen über den zeitlichen Ablauf der aufgenommenen Vorgänge machen zu können. Das Mikrophon war bei den Messungen in nächster Nähe der Pfeifen aufgestellt, um raumakustische Einflüsse weitgehend auszuschalten.

Bei den Messungen sollte zunächst einmal geklärt werden, ob sich durch eine Veränderung des Anschlages auf dem Manual eine Änderung des Einschwingvorganges objektiv nachweisen läßt. Denn wenn dies nicht der Fall wäre, müßte es gleichgültig sein, auf welche Art die Ventilbewegung erfolgt, ob mechanisch oder elektrisch.

Die Untersuchungen wurden an einer bei der Orgel am häufigsten verwandten Stimme, einem Prinzipal, vorgenommen; gewählt wurde Prinzipal 8′, Labium $^1/_4$, Aufschnitt $^1/_3$, Ton c_1. Abb. 2a gibt ein Oszillogramm des Anklingvorganges bei schlagartig schnellem Herunterdrücken der Taste. Es zeigt sich ein ähnliches Bild, wie es schon an anderer Stelle[4]) veröffentlicht ist. Die Form des Einschwingvorganges ist im wesentlichen durch den ersten Oberton bedingt, der zuerst einschwingt und auch die größte Amplitude besitzt. Der Grundton folgt ziemlich spät und weist eine Erscheinung auf, die bei einigen Aufnahmen beobachtet wurde, während sie bei anderen bei gleichem Anschlag fehlte. Die Amplitude dieses Grundtones steigt an, geht darauf praktisch wieder auf Null zurück, um dann erst endgültig auf ihren stationären Endwert einzuschwingen. Anscheinend handelt es sich dabei um eine Kopplung von verschiedenen Luftmassen, die im Augenblick des Ansprechens besonders wirksam ist. Im Bereich von 700—1400 Hz sind deutlich Formanten zu erkennen. Bei der gleichen Pfeife wurde nun Abb. 2b aufgenommen; die Taste ist hier so langsam wie irgend möglich — viel langsamer als es im normalen Spiel vorkommen kann — heruntergedrückt worden. Der Einschwingvorgang verläuft praktisch ebenso wie in Abb. 2a; es ist sogar die Einschwingzeit der Oktave etwas geringer. Beide Aufnahmen (Abb. 2a und 2b) wurden verschiedentlich wiederholt, um Zufälligkeiten bei der Ansprache auszuschließen. Es zeigten sich auch bei gleichem Anschlag geringfügige Unterschiede des Einschwingvorganges in den einzelnen Teiltonbereichen, doch waren diese sehr klein und rühren sicher daher, daß eine aus Holz gearbeitete mechanische Traktur nach einiger Gebrauchszeit soviel Spiel in den Lagerstellen aufweist, daß Zufälligkeiten im Öffnungsvorgang der Ventile unvermeidlich sind. Innerhalb dieser zufälligen Unterschiede liegt auch der Verlauf des Einschwingvorganges bei langsamem und schnellem Drücken der Taste. Das Ergebnis beweist also, daß eine Beeinflussung sowohl der Form als auch der spektralen Zusammensetzung des Anklingvorganges durch die Art des Anschlages bei der heute üblichen mechanischen Traktur nicht möglich ist. Zu denselben Feststellungen kommt man auch bei anderen Registern. Dies ist durchaus einleuchtend, wenn man sich einmal vor Augen führt, wie der Ansprechvorgang einer Pfeife

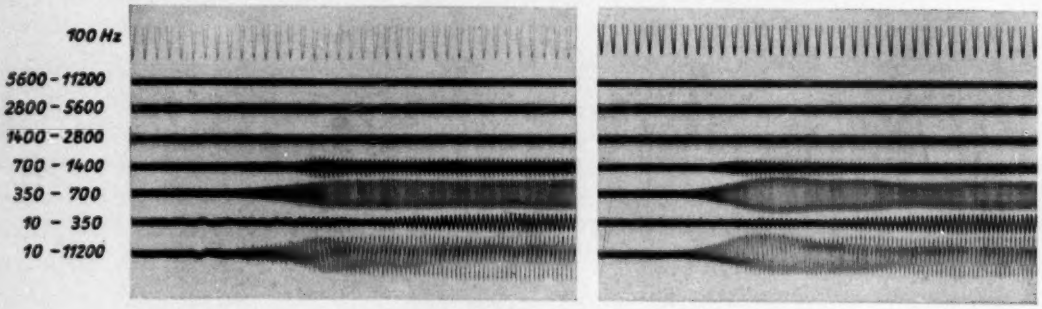

Abb. 2a Abb. 2b

Einschwingvorgang Prinzipal 8′ Ton c_1; Herunterdrücken der Taste a) schlagartig schnell b) so langsam wie möglich

[4]) F. Trendelenburg, E. Thienhaus und E. Franz, Akust. Z. 3 (1938), S. 7.

verläuft. Zu diesem Zweck wurden die Tasten mit Hilfe einer Schneckengangführung extrem langsam niedergedrückt und mit dieser Vorrichtung in mehreren Kirchen der Einschwingvorgang verschiedener Orgelregister im Zeitlupentempo beobachtet. Aus der Fülle der Beobachtungen seien hier einige charakteristische Anklingvorgänge kurz beschrieben.

An einer 1938 erbauten Orgel[5]) mit mechanischer Schleiflade wurde bei einem Prinzipal 8′ derjenige Typus des Einschwingvorganges beobachtet, der auch bei anderen Pfeifen am häufigsten auftrat. Der Klang setzte mit dem zweiten Teilton leise ein; bei weiterem Niederdrücken der Taste sprang dieser in den dritten Teilton um, der fast bis zur Septime hinauflief, um dann etwas verstärkt in den zweiten Teilton zurückzufallen. Dieser Schneidenton löste kurz darauf unter Schwebungserscheinungen den Grundton (Körperton der Pfeife) aus. Der ganze Vorgang spielte sich dabei innerhalb eines Tastenhubes von Bruchteilen eines Millimeters ab.

Bei einem Nasat $1^1/_3$′ war nur der zweite Teilton ganz kurz hörbar und auch erst, nachdem das Oberlabium etwas vorgezogen war.

Eine enge Flöte, mit bogenförmigem Oberlabium nach alter Art intoniert, zeigte keine Vorsprache, abgesehen von etwas undefinierbarem Geräusch. Ebenso erfolgte bei den Rohrflöten der Einsatz des Grundtones ohne Vorsprache.

An einer kurz vor der Jahrhundertwende gebauten mechanisch gesteuerten Kegellade[6]) wurden bei einem Gemshorn 8′ sogar alle Teiltöne bis zum fünften Teilton bei dem zeitlupenförmig verlaufenden Einschwingvorgang nachgewiesen. Grundsätzlich zeigte sich, daß bei schnellerem — aber immer noch sehr langsamem — Niederdrücken der Taste nicht mehr die ganze Obertonreihe der Vorsprache zur Ausbildung kam, sondern diese sich meist auf den zweiten und dritten Teilton beschränkte.

So interessant diese Beobachtungen an sich sind, so wenig darf man doch ihre Bedeutung für das praktische Orgelspiel überschätzen. Bis zur Erreichung eines bestimmten Winddruckes, bei dem der Grundton einsetzt, ließen sich bei extrem langsamer Tastenbewegung zwar Obertöne in verschiedener Anzahl und Reihenfolge nachweisen. Wie sich dabei zeigte, ist die Anzahl dieser im Einschwingvorgang auftretenden Teiltöne sehr stark von der Intonierung der Pfeifen abhängig. Die mechanische Traktur ist nun mit einem Druckpunkt im Tasthub versehen, der spieltechnisch erwünscht ist und gleichzeitig ein so langsames Herabdrücken der Taste in dem kritischen Bereich, wie es bei den oben beschriebenen Versuchen geschah, nicht zuläßt. Der kleine Bereich im Tastenhub von etwa 0,3—0,5 mm kurz hinter dem Druckpunkt der Taste, in dem sich der Einschwingvorgang abspielt, wird also durch den Druckpunkt und das unvermeidliche Spiel in den Lagerstellen mit einer Geschwindigkeit durchlaufen, die unabhängig vom Spieler ist und von diesem nicht beeinflußt werden kann. Es mußte daher gleichgültig sein, auf welche Weise die Betätigung der Ventile erfolgt. Um dies noch einmal zu demonstrieren, wurde die mechanische Traktur unterbrochen und eine elektrische Steuerung in Form eines Saugmagneten provisorisch eingebaut. Dieser wurde über einen Schalter betätigt und ermöglichte einerseits ein ganz schnelles Öffnen des Ventils und andererseits durch eine an ihm vorgesehene veränderliche Öldämpfung einen sehr langsamen Öffnungsvorgang. Zwei Proben der damit gewonnenen Oszillogramme zeigen Abb. 3a und 3b. Wie zu erwarten war, ist sowohl bei Abb. 3a (Magnet mit Luftdämpfung) als auch bei Abb. 3b (Magnet mit zusätzlicher Öldämpfung) der Verlauf des Anklingvorganges — abgesehen von den schon früher erwähnten zufällig auftretenden Verschiedenheiten — grundsätzlich der gleiche wie bei der Betätigung der Ventile vom Spieltisch über eine mechanische Traktur.

Die Frage, ob z. B. bei der Restaurierung alter Orgeln die vorhandene mechanische Traktur durch eine elektrische Steuerung ersetzt werden soll oder nicht, kann also nicht mit dem Argument der Möglichkeit einer Klangbeeinflussung zugunsten der direkten mecha-

[5]) Lister Kirche, Hannover (Orgelbau E. Hammer).
[6]) Ägidienkirche, Hannover (Orgelbau E. Hammer)

nischen Steuerung entschieden werden. Vielmehr dürfen dabei nur noch andere Faktoren, wie Betriebssicherheit, Spielfähigkeit der Manuale usw. maßgebend sein, die wohl dann fast immer eine Entscheidung zugunsten der elektrischen Steuerung nahelegen, soweit man nicht besonders charakteristische alte Orgeln unverändert der Nachwelt überliefern will. Vor allem vom Standpunkt der Denkmalspflege ist diese Erhaltung mancher mechanischer Trakturen zu begrüßen, da sie ein Zeugnis von der vor Jahrhunderten hochentwickelten handwerklichen Holzbearbeitungstechnik ablegen. Unzulässig dürfte es aber sein, bei den heute durch die moderne Elektrotechnik zur Verfügung stehenden Möglichkeiten sich im Bau und damit der Verwendungsfähigkeit neuer Orgeln durch Übernahme früher verwandter mechanischer Steuerungen freiwillig Beschränkungen aufzuerlegen. Wenn von den Musikern eine Möglichkeit der Beeinflussung des Einschwingvorganges gewünscht wird, — was im Interesse der Ausschöpfung letzter Klangmöglichkeiten zu begrüßen ist —, dann ließe sich diese sicher noch eher durch elektrische als durch mechanische Hilfsmittel betriebssicher erreichen.

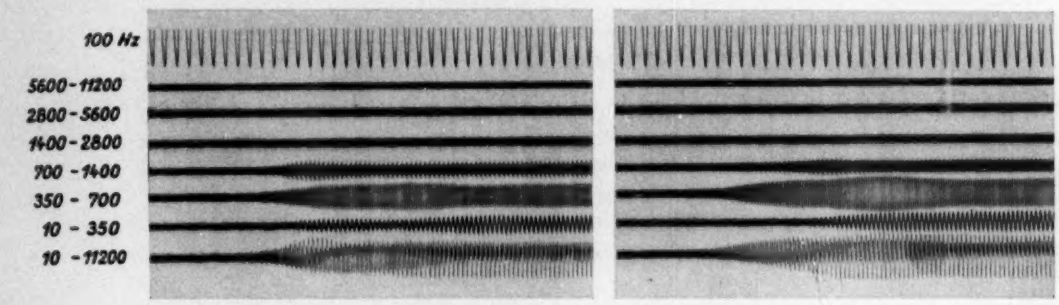

Abb. 3a Abb. 3b

Einschwingvorgang bei elektrischer Steuerung durch einen Saugmagnet; a) mit Luftdämpfung, b) mit Öldämpfung

Es wäre zu wünschen, wenn in diesem Sinne recht bald der Orgelbau in Zusammenarbeit mit den Musikern und den interessierten Kräften der Elektrotechnik neue Wege zur immer noch umstrittenen stileigenen Orgel des 20. Jahrhunderts finden würde.

(Eingegangen am 9. April 1941.)

Ein neuer elektrischer Stimmtongeber für 440 Hz

Von H. J. v. Braunmühl und O. Schubert

(Mit 5 Textabbildungen)

Die musikalische Stimmung in den europäischen Ländern befindet sich seit längerer Zeit in einer Unordnung, die zu ernsthaften praktischen Schwierigkeiten geführt hat. Von Land zu Land, von Orchester zu Orchester, von Instrument zu Instrument ist die benutzte Stimmung so stark verschieden, daß es nicht mehr ohne weiteres möglich ist, Instrumente, die an einer Stelle benutzt werden, auch an einer anderen Stelle einzusetzen. Die hieraus entstehenden Schwierigkeiten für Gastspiele eines Ensembles, für den Neubau und den Vertrieb von Musikinstrumenten usw. liegen auf der Hand.

Die Musikgeschichte lehrt, daß diese Uneinheitlichkeit der musikalischen Stimmung mehrfach zu Normungsbemühungen geführt hat. Die letzte Regelung wurde 1885 in Wien getroffen mit der Festlegung, als Kammerton a' die Frequenz 435 Hz zu verwenden. Diese Wiener Regelung wurde in der Folgezeit in den meisten Ländern nicht genügend beachtet, vielleicht auch deshalb, weil nähere Ausführungsbestimmungen für die Einhaltung

der festgelegten Musizierstimmung bei der praktischen Musikausübung fehlten.

Einer nur schwer zu begründenden Tendenz folgend, ist die Musizierstimmung immer weiter gestiegen und liegt z. Z. im Mittel bei etwa 443 Hz für das a', wobei Extremwerte bis nahe an 450 Hz vorkommen.

Der Deutsche Akustische Ausschuß hat in einem Stimmtonausschuß die Möglichkeit einer Neufestsetzung des Stimmtons seit Jahren studiert. Dabei konnte es sich nicht einfach darum handeln, etwa die Wiener Stimmung 435 Hz als verbindlich zu erklären; vielmehr waren die jetzt in Gebrauch befindlichen Musikinstrumente zu berücksichtigen. In Übereinstimmung mit der Auffassung aller an der Stimmtonfrage interessierten Kreise gelangte der Deutsche Stimmtonausschuß zu der Auffassung, daß die Frequenz von 440 Hz als Musizierstimmung den für die Neufestsetzung günstigsten Wert darstellt, der übrigens auch in überseeischen Ländern bereits als Norm gilt. Es gelang vor einiger Zeit auch, eine internationale Einigung dahin zu erwirken, daß eine neue Stimmtonregelung in den einzelnen Ländern auf der Basis der Frequenz 440 Hz erfolgen möge.

Es muß besonders betont werden, daß die Einführung des Stimmtons 440 Hz keine Heraufsetzung der jetzt angewendeten Musizierstimmung zur Folge hat, sondern daß im Gegenteil eine gewisse Herabsetzung der viel zu hoch getriebenen Stimmung erfolgen muß. Eine Rückkehr zu der Wiener Stimmung 435 Hz wäre ohne beträchtliche Umänderung zahlloser Instrumente überhaupt nicht durchführbar gewesen; die Praxis hat inzwischen schon gezeigt, daß auch für die Stimmung 440 Hz bei zu hoch gestimmten Klangkörpern einige geringfügige Änderungen notwendig werden können. Ein Grund mehr, endlich die notwendige Vereinheitlichung durchzuführen.

Eine Neuregelung nur auf dem Verordnungswege wird — wie die Wiener Festsetzung genügend gezeigt hat — von der Praxis nicht beachtet. Sie muß begleitet sein von der Verbreitung der Stimmtonfrequenz als solcher und von der Bereitstellung von technischen Mitteln, nach denen eine Einstimmung und Nachstimmung an allen Plätzen erfolgen kann, an denen Musikinstrumente hergestellt oder benutzt werden.

Beide Maßnahmen sind getroffen bzw. eingeleitet worden. Bis über die Grenzen des Reiches verbreitet der Deutschlandsender werktäglich gegen 10,45 Uhr außer der Frequenz 1000 Hz die neue Stimmtonfrequenz 440 Hz. Sie wird von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Berlin mit einer Genauigkeit in der Größenordnung 10^{-8} erzeugt. Ihre Ausstrahlung soll zur Kontrolle und Nacheichung von Unterstandards, wie Stimmgabeln, Stimmpfeifen und ähnlichen Geräten dienen. Derartige Unterstandards sind für den praktischen Gebrauch nur von bedingtem Wert. Bei einem Teil von ihnen ist die Lautstärke zu gering, um z. B. einem Orchester das Einstimmen zu ermöglichen. Andere sind von sich aus nicht konstant genug, um der Forderung nach einheitlicher Stimmung entsprechen zu können; z. B. hängt bei Stimmpfeifen die erzeugte Frequenz stark vom Anblasedruck ab. Aus diesem Grunde ist auch die übliche Orchestereinstimmung nach der Oboe zu verwerfen. Fast allen derartigen Geräten ist außerdem der eine gewichtige Nachteil eigen, daß sie, sei es mutwillig, sei es versehentlich in ihrer Frequenz verändert werden können.

Aus der Erwägung heraus, daß die Reichweite von Rundfunkdarbietungen zu vorbildlichem Verhalten auf dem Gebiete der Musizierstimmung verpflichtet, hat der Deutsche Rundfunk einen Stimmtongeber durchgebildet, der von den beschriebenen Nachteilen frei und geeignet ist, nicht nur bei Rundfunksendungen, sondern bei allen öffentlichen Musikdarbietungen und bei Schallaufnhamen, sowie im Musikinstrumentengewerbe benutzt zu werden. Nachstehend werden die Eigenschaften des neuen Gerätes beschrieben.

Auf Grund von Versuchen wurden zunächst die erforderlichen Eigenschaften eines geeigneten Stimmtones bestimmt:

1. Die Festlegung der erforderlichen Frequenzgenauigkeit geht von der Tatsache

aus, daß musikalische Beobachter schon Tonhöhenunterschiede von 3 Hz bei einer Frequenz von 1000 Hz wahrnehmen. Die Genauigkeit der Sollfrequenz eines Normals muß daher auch bei 440 Hz unter $\pm$ 1,5 % liegen. Als anzustrebender Wert für die Konstanz der Normalfrequenz wurde ein Drittel davon, das ist $\pm$ 0,5 % oder $\pm$ 0,22 Hz angenommen.

2. Bei praktischen Versuchen mit Stimmtönen verschiedener Klangfarbe zeigte sich, daß die Musiker einen reinen Ton als zum Stimmen wenig geeignet bezeichnen. Am günstigsten erwiesen sich Töne (Klänge) mit einem Oberwellengehalt von etwa 25 %.
3. Die erforderliche Lautstärke des Stimmtons ist nach der Größe des zu stimmenden Klangkörpers und nach der Größe des Raumes verschieden. Die größte erforderliche Lautstärke wurde zu 100 Phon in einem Meter Abstand von der Schallquelle gemessen. Für den Stimmtongeber wird daher Regelbarkeit der Lautstärke bis zu diesem Grenzwert gefordert.
4. Das Temperaturintervall, in dem das Stimmtonnormal die oben angegebene Frequenztoleranz einhalten soll, ist mit Rücksicht darauf, daß musikalische Sendungen in temperierten Räumen stattfinden, mit 10° C bis 30° C begrenzt.

Die gewünschten Stimmtoneigenschaften lassen sich am besten von einem elektroakustischen Gerät erreichen. Die Wahl des frequenzbestimmenden Elementes für den Stimmtongeber fiel auf die elektrisch erregte Stimmgabel. Die Gründe hierfür sind naheliegend: Es liegt über das Verhalten der Stimmgabeln in bezug auf Frequenzkonstanz und Temperaturabhängigkeit reiche Erfahrung vor. Stimmgabeln lassen sich in bekannter Weise bequem elektrisch erregen. Die Frequenz der Stimmgabeln unterliegt nach Ablauf einer gewissen Lagerzeit keiner Veränderung mehr. Die Temperaturabhängigkeit ist bei Verwendung von Spezialstählen in der Größenordnung von 10^{-5}.

Konstruktive Durchbildung

Die Stimmgabel wurde mit zwei Erregerspulensystemen konstruktiv zu einer Einheit zusammengefaßt (Abb. 1). Diese Einheit ist steckbar ausgeführt. Die Stimmgabel ist auf einen massiven Gußkörper aufgesetzt, auf den auch die beiden Erregerspulen montiert sind. Das Ganze ist innerhalb eines zylinderischen Abschirmtopfes in entsprechend weicher Lagerung untergebracht. Die akustische Abschirmung der Stimmgabelschwingung erwies sich als notwendig, um Rückwirkungen des Lautsprechers in dem eng zusammengebauten Gerät zu vermeiden. Die vollständige Kapselung schien auch deswegen zweckmäßig zu sein, weil dadurch ein besserer Schutz der empfindlichen Gabel gegeben ist, und die einmal vorgenommene Eichung durch Anbringung einer Plombe gesichert werden kann.

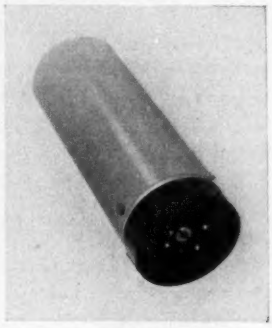

Abb. 1. Elektromagnetisches Stimmgabelsystem (gekapselt)

Das beschriebene Stimmgabelelement, der über die Stimmgabel rückgekoppelte Verstärker mit Netzanschlußgerät und Lautsprecher sind in ein Gehäuse zusammengebaut (Abb. 2). Die

Abb. 2. Tragbarer Stimmtongeber

Schaltung des Gerätes ist der Abb. 3 zu entnehmen. Eine Leistungsröhre EL 11 ist über die Stimmgabel rückgekoppelt. Die Röhre liefert gleichzeitig die Tonfrequenzspannung für den Lautsprecher. Die Einschaltdauer des

Gerätes beträgt 1 Minute. Die Frequenzänderung während mehrstündigen Betriebes und bei Temperaturen zwischen 10 und 30° C betrug $\pm$ 0,15 Hz. Die Abmessungen des vorstehenden Gerätes betragen 20 × 14 × 22 cm, das Gewicht 7,450 kg[1]).

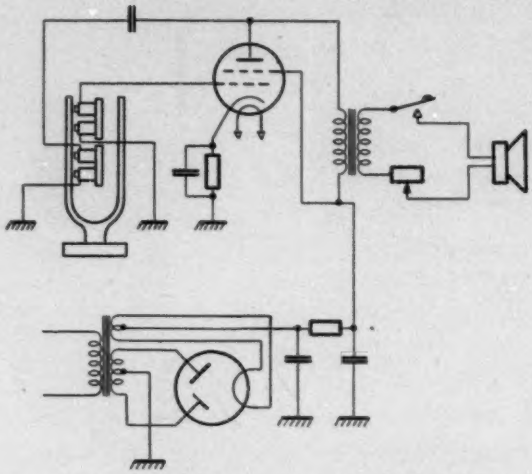

Abb. 3. Schaltung des tragbaren Stimmtongebers

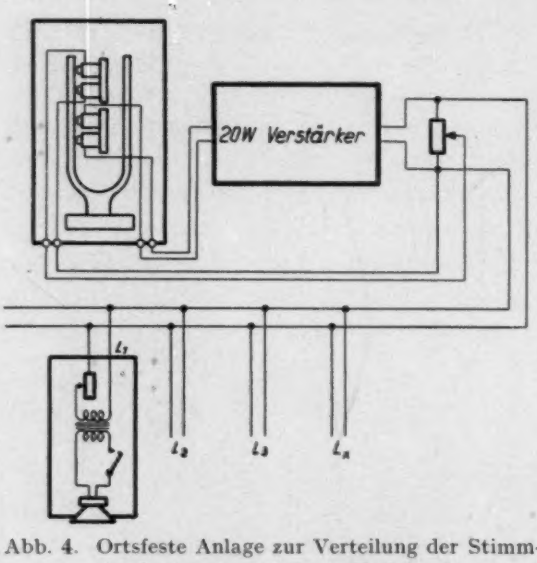

Abb. 4. Ortsfeste Anlage zur Verteilung der Stimmtonfrequenz an mehrere Verbraucher

Für gewisse Anwendungsgebiete, besonders in Rundfunkhäusern, aber auch in Tonfilmateliers und eventuell in Opernhäusern, Konzertsälen usw., wo an mehreren Stellen häufig und u. U. gleichzeitig der Stimmton erzeugt werden soll, kann eine ortsfeste Anlage zweckmäßig sein. Das Stimmgabelelement des transportablen Gerätes ist so durchgebildet, daß es auch hierfür ohne weiteres verwendet werden kann. Es liegt in einer einfachen Rückkoppelungsschaltung (s. Abb. 4). Die Stimmtonfrequenz wird über einen Leistungsverstärker mit einer Ringleitung nach den einzelnen Verbraucherstellen geschaltet.

Die in den Aufnahmeräumen verwendeten Lautsprecher sind ihrer besonderen Bestimmung angepaßt (Abb. 5). In einem zylindrischen Tragkörper ist ein elektrodynamisches 2-Watt-Lautsprechersystem mit nach oben liegender Membrane eingebaut. Die Rückstellkraft des Systems kann durch ein hinter der Membrane liegendes abgeschlossenes Luftvolumen so eingestellt werden, daß der Lautsprecher bei 440 Hz in Resonanz schwingt. Durch eine entsprechende Tonführung strahlt das System nach allen Seiten gleichmäßig. In das Gehäuse ist ein Lautstärkeregler und ein Druckschalter zum Ein- und Ausschalten eingebaut. Das Lautsprechergehäuse kann entweder auf einen Ständer aufgesetzt und kann an der gewünschten Stelle des Aufnahmeraumes aufgestellt oder auch aufgehängt werden. Natürlich kann die Betätigung des Stimmtonlautsprechers (bei Dauerbetrieb des zentralen Generators) mit Hilfe eines Druckknopfes vom Dirigentenpult oder von einer beliebigen anderen Stelle aus erfolgen.

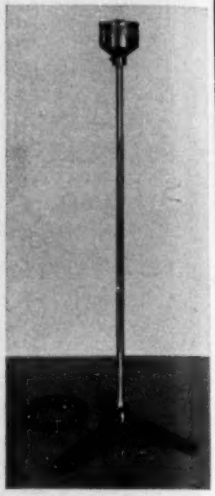

Abb. 5. Stimmtonlautsprecher auf Ständer

Zusammenfassung

In Anerkennung der Wichtigkeit der Bestrebungen zur Vereinheitlichung der Musizierstimmung, die vom Deutschen Akustischen Ausschuß betrieben wird, hat die Reichs-Rund-

[1]) Die Geräte werden von den Berliner Physikalischen Werkstätten hergestellt.

funk-Gesellschaft Maßnahmen getroffen, um die Einführung des empfohlenen neuen Stimmtones von der Frequenz 440 Hz im Deutschen Rundfunk zu sichern und der Allgemeinheit zu ermöglichen. Der täglich über den Deutschlandsender ausgestrahlte Ton von 440 Hz gibt allen Interessenten die Möglichkeit, die Stimmung von Instrumenten zu kontrollieren und die Eichung von provisorischen Stimmtongebern zu korrigieren. Zur Sicherung der dauernden Stimmtoneinhaltung in der Praxis wurde ein einfaches Gerät geschaffen, welches alle Ansprüche an Genauigkeit, Betriebssicherheit und Bequemlichkeit der Bedienung erfüllt.

(Eingegangen am 27. Mai 1941.)

SCHRIFTTUM

Sämtliche in diesem Heft besprochenen oder vom Verlag angezeigten Bücher sind in allen deutschen Buchhandlungen zu erhalten

Bruno Beckmann, **Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen.** Bücherei der Hochfrequenztechnik, Band 1. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1940. 8°, 282 S., 207 Abb. Preis gebunden 25,60 RM.

J. Zenneck, einer unserer verdientesten Pioniere des Funkwesens, dem die physikalische Welt unlängst zu seinem 70. Geburtstag gratulieren konnte, hat eine Reihe von zusammenfassenden Darstellungen über die verschiedensten Zweige der Hochfrequenztechnik herausgegeben: Die Bücherei der Hochfrequenztechnik. Für die Bearbeitung der einzelnen Gebiete wurden hervorragende Fachleute gewonnen, die dem Leser neben dem zum Allgemeingut gehörigen Standardwissen und einem umfassenden Bericht über ältere und neuerer Forschungsergebnisse, vor allem einen gründlichen Einblick in die aktuellen Probleme, in die jüngsten theoretischen und experimentellen Erkenntnisse und konstruktiven Neuerungen in anschaulicher, leicht verständlicher Weise und stets mit Betonung der praktischen Anwendung vermitteln. Jeder Band ist für sich abgeschlossen, so daß die vorliegende Sammlung dem Physiker und Techniker sowohl zur Beantwortung dieser oder jener Sonderfrage als auch zur allgemeinen Unterrichtung gleichermaßen von Nutzen ist. Daß auch die vorwiegend akustisch Interessierten diese Bände freudig begrüßen, braucht kaum besonders hervorgehoben zu werden. Liefert doch die Hochfrequenztechnik nicht nur wegen der allgemeinen Analogie zwischen der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen und der Schallausbreitung, sondern auch im Hinblick auf die in neuerer Zeit ständig in höhere Frequenzgebiete vordringende Ultraschalltechnik der akustischen Meßtechnik vielerlei wertvolle Erfahrungen und Anregungen.

Der 1. Band der Bücherei der Hochfrequenztechnik ist der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen gewidmet, jener fundamentalen Energieträger, die sich je nach der Frequenz in verschiedener Form als Höhen- oder Röntgenstrahlen, als Licht oder als Wellen der Funktechnik äußern. Vorangestellt sind die Grundlagen des elektromagnetischen Feldes, die Maxwellsche Theorie und ihre experimentelle Bestätigung durch die Hertzschen Untersuchungen über die Strahlungsvorgänge. Ausführlich wird die Theorie der Wellenausbreitung über die ebene Erde und über die Erdkugel, sowie die Theorie der Raumstrahlung aus der Ionosphäre (Heaviside-Schicht) behandelt. Entsprechend der wachsenden Bedeutung der Ultrakurzwellen und des Fernsehens sind weiterhin die neuesten theoretischen Arbeiten über die Brechung elektromagnetischer Wellen in den unteren Schichten (Tropospäre) berücksichtigt.

Breitester Raum ist den experimentellen Ergebnissen der Ionosphärenforschung gegeben. Zahlreiche Diagramme und Registrierstreifen über die regelmäßigen tages- und jahreszeitlichen Veränderungen (einschließlich Sonnenfleckenperiode) und die verschiedenartigen Unregelmäßigkeiten bzw. Störerscheinungen durch Einflüsse von Nordlicht, Meteoriten und Sonneneruptionen ergeben ein anschauliches Bild vom Verhalten der Ionosphäre und lassen zugleich die außerordentlich mühsame Kleinarbeit erkennen, mit der unsere heutigen Kenntnisse über die elektromagnetischen Erscheinungen in diesen fernen Schichten errungen worden sind. Nicht minder ausführlich werden anschließend die Messungen über die Ausbreitung von Wellen aller Wellenlängen (Feldstärkemessungen von Dezimeterbis Langwellen), über die Reichweite, die toten Zonen, Schwunderscheinungen, meteorologische Vorgänge, über Polarisation und Peilschwankungen sowie über atmosphärische Störungen erörtert. — Hervorzuheben sind das reichhaltige Namen- und Sachregister und die große Fülle der angeführten Literaturstellen, die — was der Leser besonders dankbar empfinden wird — neben der Quellenangabe stets auch den vollen Titel der betreffenden Arbeit enthalten. E. Thienhaus

HORST ROTHE und WERNER KLEEN, Bücherei d. Hochfrequenztechnik. Bd. 2: **Grundlagen und Kennlinien der Elektronenröhren,** 325 S. 196 Abb. Geh. 18,40 RM., geb. 20,— RM. Bd. 3: **Elektronenröhren als Anfangsstufen-Verstärker,** 303 S. 197 Abb. Geh. 17,40 RM., geb. 19,— RM. Bd. 4: **Elektronenröhren als End- und Senderverstärker,** 141 S. 118 Abb. Geh. 9,40 RM., geb. 11,— RM.

Im Rahmen der von J. ZENNECK herausgegebenen Bücherei der Hochfrequenztechnik[1]) haben 2 führende Fachleute der Röhrentechnik eine fünfbändige Monographie über die Elektronenröhre geschrieben, wovon bisher die ersten 3 Bände erschienen sind, die die allgemeinen Grundlagen, die reine Spannungsverstärkung (Vorverstärker) und die Leistungsabgabe (Endstufe, Sender) behandeln. Die Herausgabe einer so umfassenden Darstellung über die Theorie, die praktischen Anwendungen und die Konstruktion der Elektronenröhre erscheint heute um so mehr gerechtfertigt, als nach der stürmischen Entwicklung der letzten Jahrzehnte, die laufend neue Konstruktionen und Modelle brachte, nunmehr eine gewisse Stabilisierung in den Röhrentypen und der grundsätzlichen Wirkungsweise eingetreten ist.

Die genaue Kenntnis des Elektronenaustritts, der Raumladungserscheinungen, der Stromverteilung und Elektronenbahnen gestattet die Eigenschaften von Elektronenröhren auch bei den kompliziertesten Entladungsanordnungen zu berechnen, so daß der Konstrukteur heute praktisch jede röhrentechnische Aufgabe sozusagen „auf Anhieb" lösen kann. Die Zusammenfassung der im Schrifttum verstreuten Ergebnisse zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über diesen gesamten Fragenkomplex haben sich die Verfasser zur Aufgabe gestellt. Daneben enthalten die ausgezeichnet geschriebenen Bücher auch eine Unsumme eigener Industrieerfahrungen der Verfasser und ihrer Mitarbeiter (Telefunken Laboratorien), die, das muß besonders betont werden, auch persönlich ein großes Verdienst an dem gegenwärtigen hohen Stand der Röhrentechnik haben, insbesondere auch daran, daß die Verstärkerröhre heute ein fest definiertes Schaltelement geworden ist, dessen Eigenschaften, „laut Katalog" festliegen und — vielfach mit erstaunlich engen Toleranzen und zahlreichen Nebenbedingungen — von seiten des Herstellers als konstant und verbindlich garantiert werden können. Diese Leistung der Röhrenentwicklung und -fabrikation kann nicht hoch genug gewertet werden, ist es doch erst dadurch möglich geworden, daß die Verstärkerröhre weitesten Kreisen von Physikern und Ingenieuren als vielseitiges, unentbehrliches Experimentier-Hilfsmittel und als stabiles und zuverlässiges Konstruktionselement zur Verfügung steht. Es sei nicht versäumt, an dieser Stelle den besonderen Dank der Akustik abzustatten, deren große Erfolge mit der Entwicklung der Elektronenröhre aufs engste verknüpft sind.

[1]) Siehe vorhergehende Besprechung.

Eine gedrängte Inhaltsübersicht über die 3 vorliegenden Bände zeigt die Einteilung des Stoffes und zugleich die gründliche Behandlung des ganzen Gebietes:

Bd. 2: Gesetze und Untersuchungen des Anlaufstromes, Raumladungsgesetz für verschiedene Anfangsgeschwindigkeiten, statische Potentialfelder, Elektronenbahnen, geometrische Elektronenoptik, Stromverteilung, Laufzeiten, Sekundäremission. — Statische Kennlinien der Diode, Triode und Mehrgitterröhren. Feinstruktur der Kennlinien, Röhrenkapazitäten, konstruktiver Aufbau von Verstärkerröhren.

Bd. 3: Lineare und nichtlineare Theorie der Verstärkung, graphische Behandlung, nichtlineare Verzerrungen, Mischung, Rückkopplung, Gegenkopplung. — Widerstandsverstärker, Gleichstromverstärker, Transformatorverstärker, Hochfrequenzverstärker, Breitbandverstärker, Gitter-Anodenkapazität, Mischschaltungen, Verstärkungsregelung. — Störerscheinungen: Rauschen, Brummen, Klingen, Sekundäremission.

Bd. 4: Endverstärker in A- und B-Betrieb. Gegentakt-Endverstärker in A- und A/B-Betrieb, Senderverstärker, Modulation des Senderverstärkers, Frequenzvervielfachung.

Im Interesse der stofflichen Konzentration und einer ausführlichen und leicht verständlichen Darstellung steht die Elektronenröhre stets im Mittelpunkt der Betrachtungen, während äußere Schaltelemente oder ganze Schaltungen nur so weit einbezogen werden, wie es das Verständnis der Röhrenvorgänge und -eigenschaften erfordert. Die Bücher bilden ein wertvolles Gegenstück zu BARKHAUSENS Standardwerk, und es bleibt noch zu wünschen, daß die beiden angekündigten Bände über Schwingungserzeugung und Gleichrichtung sowie schließlich über das Verhalten der Elektronenröhren bei hohen Frequenzen recht bald folgen mögen.

E. THIENHAUS

VDI-Jahrbuch 1940. Die Chronik der Technik. Herausgegeben im Auftrage des Vereins deutscher Ingenieure von A. LEITNER VDI. DIN A 5, 311 S. Berlin 1941 VDI-Verlag GmbH. Preis brosch. RM. 3,50 für VDI-Mitglieder RM. 3,15.

Die durch den Krieg hervorgerufene starke Inanspruchnahme aller verfügbaren Kräfte hat zur Folge, daß für das Studium der Fachliteratur nur wenig Zeit zur Verfügung steht. Hier zeigt sich der Wert einer Literaturübersicht, wie sie das VDI-Jahrbuch darstellt, ganz besonders. Um so mehr muß aber auch den Verfassern der einzelnen Abschnitte gedankt werden, die sich der mühevollen Zusammen-

stellungsarbeit unterzogen und damit das Erscheinen dieses siebenten Bandes ermöglicht haben.

Die Akustik ist in den Abschnitten „Schalltechnik" von R. BERGER, „Technische Physik" (G. JOOS) und „Fernmeldetechnik" (W. STÄBLEIN) vertreten. Das Kapitel „Schwingungslehre" wurde von A. WEIGAND verfaßt. GERHARD BUCHMANN

KATUMI IMAHORI, **Analysis of Varying Sounds, A New Photographic Method with Applications to Typical Examples.** J. Fac. Sci., Hokkaido Imp. Univ., Ser. II, Vol. III, Nr. 3 (1940).

Er wird nach einer kurzen Erläuterung einiger bekannter Verfahren zur Klanganalyse ein neues photographisches Verfahren beschrieben, das sich besonders für die Untersuchung von Geräuschen eignet.

Das von dem Schallvorgang modulierte Licht einer Glimmlampe fällt durch eine Glasplatte P, die sog. Analysierplatte (s. Abb. 1). Mittels einer Optik wird die Analysierplatte auf einen Film F, der mit gleichmäßiger Geschwindigkeit v parallel zur Platte bewegt werden kann, abgebildet. Die Analysierplatte ähnelt in ihrer Wirkungsweise einer stroboskopischen Platte. Ihre Lichtdurchlässigkeit ändert sich in der Bewegungsrichtung des Filmes (von einem konstanten Anteil abgesehen) sinusförmig, während sich in der dazu senkrechten Richtung auf der Platte die Länge der Sinuswellen gleichmäßig ändert. Bei sinusförmig moduliertem Licht erhält man auf dem Film in einem je nach der Frequenz verschiedenen Abstande vom Filmrand einen gleichmäßig unterteilten Streifen (s. Abb. 2). Um die Amplitude des hierdurch angezeigten Tones zu bestimmen, muß man jedoch den Film oder einen positiven Abzug davon photometrisch auswerten. Bei einem zusammengesetzten Klang erhält man ein den Komponenten des Klanges entsprechendes System von Streifen.

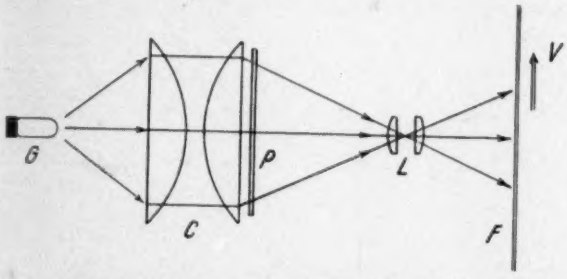

Abb. 1. Schematische Darstellung der Meßapparatur

Im Gegensatz zu entsprechenden Problemen in der Optik ist man bei der Klanganalyse von Geräuschen, also im wesentlichen unperiodischen Schallvorgängen, nicht nur an einem hohen Auflösungsvermögen für das Frequenzspektrum interessiert, sondern man will auch noch den zeitlichen Verlauf desselben möglichst genau kennen. Beide Forderungen können bekanntlich nicht beliebig genau erfüllt werden, sondern immer nur eine auf Kosten der anderen. Bedeuten Δv das Auflösungsvermögen und Δt die Zeitkonstante der Apparatur, so gilt, wie für einige Beispiele auch ausgerechnet wird, die sog. „Unbestimmtheitsrelation" $\Delta v \cdot \Delta t \approx 1$, d. h. bei einem vorgegebenen Auflösungsvermögen hat es

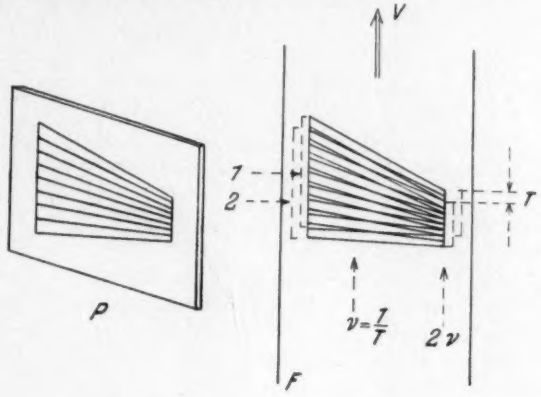

Abb. 2. Erläuterung des Analysierprozesses

wegen der Einschwingvorgänge nur physikalischen Sinn, nach zeitlichen Änderungen zu fragen, die sich in einem Zeitintervall abspielen, das größer als $\Delta t \approx \frac{1}{\Delta v}$ ist.

Diese prinzipielle Grenze der Leistungsfähigkeit eines Geräuschanalysierverfahrens wird nun aber im Gegensatz zu den meisten bekannten Verfahren bei der beschriebenen Klanganalyse auch praktisch erreicht, wobei noch der Vorteil besteht, daß man wegen der sehr einfachen Herstellungsmöglichkeit der Analysierplatte aus einer photographischen Platte das Auflösungsvermögen in weiten Grenzen ändern kann. Wegen dieser letzten Eigenschaft ist nach Ansicht des Verf. das Analysierverfahren auch geeignet, die Eigenschaften anderer Analysierverfahren, z. B. des menschlichen Ohres, durch vergleichende Untersuchungen zu studieren und auch nachzubilden. Als interessante zukünftige Aufgabe will der Verf. eine Analysierplatte herstellen, mit der man im ganzen Frequenzbereich das gleiche Auflösungsvermögen erhält, wie das des menschlichen Ohres.

Im folgenden sollen einige wichtige Tatsachen aus der Theorie der Geräuschanalyse, auf die der Verfasser ausführlich eingeht, kurz mitgeteilt werden.

Wenn eine Zeitfunktion $f(t)$ eine Darstellung

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(v)\, e^{2\pi i v t}\, dv$$

zuläßt, so soll

$$A(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t')\, e^{-2\pi i v t'}\, dt'$$

als das Spektrum zu $f_{(t)}$ definiert sein. Von dieser rein mathematischen Definition, die man bekanntlich aus der Fourierdarstellung für eine periodische Funktion durch einen Grenzübergang zu einer beliebig langen Periodendauer T ableitet, so daß die obige Darstellung von $f_{(t)}$ erklärt ist durch:

$$(1)\quad f_{(t)} = \lim_{T\to\infty}\left\{\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} e^{2\pi i\frac{n}{T}t}\cdot\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f_{(t')}\, e^{-2\pi i\frac{n}{T}t'}\, dt'\right\},$$

gelangt man zweckmäßigerweise zu folgendem Ausdruck, wenn man das von einem praktischen Analysierverfahren in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnete Spektrum zu betrachten hat:

$$(2)\quad A_{(v,t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t')\cdot \Delta_{(v,t'-t)}\, e^{-2\pi i v(t'-t)}\, dt'.$$

Um die physikalische Bedeutung von $A_{(v,t)}$ und ihre Abhängigkeit von der die Eigenschaften des Analysierverfahrens kennzeichnenden „Gewichtsfunktion" $\Delta_{(v,t'-t)}$ zu erläutern, seien zwei Spezialfälle betrachtet:

Einmal sei $\Delta_{(v,t'-t)} = 1$, dann erhält man bei einer harmonischen Zeitfunktion $f(t) = e^{2\pi i v_1 t}$ mit der Frequenz v_1 aus (2)

$$(3)\quad A_{(v,t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2\pi i v_1 t'}\cdot e^{-2\pi i v(t'-t)}\, dt' = \delta_{(v_1-v)}\cdot e^{2\pi i v_1 t},$$

wobei die δ-Funktion definiert ist durch:

$$\delta_{(v_1-v)} = 0 \quad \text{für } v \neq v_1$$

und

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{(v_1-v)}\, dv = 1.$$

Man erhält in diesem Falle ein Linienspektrum, also ein ideales Auflösungsvermögen, muß aber wegen der auszuführenden Integration sehr lange (theoretisch unendlich lange) Analysierzeit in Kauf nehmen.

Zweitens sei $\Delta_{(v,t'-t)} = \delta_{(t'-t)}$. Aus (2) folgt dann

$$A_{(v,t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t')\,\delta_{(t'-t)}\, e^{-2\pi i v(t'-t)}\, dt' = f(t).$$

Das Auflösungsvermögen nach der Frequenz ist in diesem Fall gleich Null, denn jede beliebige Spektralkomponente hat denselben Verlauf wie $f_{(t)}$; der zeitliche Verlauf von $f_{(t)}$ wird aber innerhalb einer auch beliebig kleinen Analysierzeit genau beschrieben, da alle Integralanteile außerhalb der Analysierzeit keinen Beitrag liefern.

An Stelle dieser beiden Grenzfälle hat man in der Praxis für $\Delta_{(v,t'-t)}$ in einem mehr oder weniger breiten Zeitintervall τ um t endliche Werte und in größeren Zeitabständen von t sehr kleine Werte anzusetzen, wobei man dann τ als die Zeitkonstante von $\Delta_{(v,t'-t)}$ bezeichnet. Statt eines Linienspektrums nach Gl. (3) erhält man dann ein mehr oder weniger breites Frequenzband und eine entsprechende Einschwingzeit.

Die physikalische Bedeutung der „Gewichtsfunktion" $\Delta_{(v,t'-t)}$ erkennt man bei der Analyse eines flüchtigen Impulses zur Zeit t_1, der durch $f_{(t)} = \delta_{(t-t_1)}$ dargestellt werden soll.

Man erhält als Spektrum:

$$(4)\quad A_{(v,t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{(t'-t_1)}\,\Delta_{(v,t'-t)}\cdot e^{-2\pi i v(t'-t)}\, dt' = \Delta_{(v,t_1-t)}\cdot e^{-2\pi i v(t_1-t)} = K_{(v,t_1-t)},$$

d. h. jede Spektralkomponente verklingt wie eine gedämpfte harmonische Schwingung und der Amplitudenverlauf derselben wird durch die „Gewichtsfunktion" dargestellt, die zur Zeit t_1 endliche Werte annimmt und nach der Zeit τ, wie aus der Definition der Zeitkonstanten folgt, verklungen ist.

Diese Tatsache, daß eine Spektralkomponente wie eine gedämpfte Schwingung, die von einer äußeren Kraft kurzzeitig erregt wurde, abklingt, schafft die Möglichkeit, den Analysator mit einem System von gedämpften Resonatoren kontinuierlich verteilter Eigenresonanzen zu vergleichen. Denn da die Differentialgleichung für den gedämpften Resonator linear ist und deshalb für die Lösung wie auch für die oben formulierte Spektraldarstellung das Überlagerungsprinzip gilt, kann man $A_{(v,t)}$ bei einer beliebigen Zeitfunktion $f_{(t)}$ entweder in Analogie setzen zur Bewegung eines gedämpften Resonators unter der Einwirkung einer äußeren Kraft von der Größe $f_{(t)}$ oder auffassen als zeitliche Überlagerung von Elementarspektren $K_{(v,t'-t)}$ (vgl. Gl. (4)),

$$A_{(v,t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{(t')}\, K_{(v,t'-t)}\, dt'.$$

Diese Gleichung drückt das Überlagerungsprinzip aus, das man meist folgendermaßen formuliert: Gehören zu zwei Zeitfunktionen $f_{1(t)}$ und $f_{2(t)}$ die Spektren $A_{1(v,t)}$ und $A_{2(v,t)}$ und gilt eine Beziehung $f_{(t)} = a_1 f_{1(t)} + a_2 f_{2(t)}$, so gehört zu $f_{(t)}$ die Spektralfunktion

$$A_{(v,t)} = a_1 A_{1(v,t)} + a_2 A_{2(v,t)}.$$

Wegen des oben angedeuteten Parallelismus zwischen dem Resonanz- und dem Überlagerungsprinzip ist es bekanntlich möglich, die Ergebnisse und Eigenschaften eines Analysierverfahrens nach dem einen oder anderen Prinzip zu erklären und z. B. das beschriebene photographische Verfahren, dessen Wirkungsweise am besten nach dem Überlagerungsprinzip zu deuten ist, mit jedem beliebigen Analysierverfahren zu vergleichen. Z. B. ist die Zahl der Perioden der sinusförmigen Schwärzungen der Analysierplatte, wie man zeigen kann, umgekehrt proportional dem logarithmischen Dekrement eines entsprechenden Resonators, und die Zeit, während der sich ein Punkt auf dem Film an allen Perioden vorbei bewegt, entspricht etwa der Zeitkonstanten Δt.

Das Überlagerungsprinzip gestattet bei der beschriebenen photographischen Methode eine meßtechnisch sehr günstige Anwendung bei der Analyse von Vorgängen, die nur aus kurzzeitigen Impulsen zusammengesetzt sind, indem man, statt die Glimm-

lampe zu steuern, den Film an den entsprechenden Stellen anhält und belichtet. Nach diesem Verfahren sind neben einigen anderen Beispielen eine große Zahl von Aufnahmen gemacht worden und in Tabellen der Arbeit beigefügt. Es werden u. a. behandelt: Amplitudenmodulation, Unterbrechungen von Schwingungsvorgängen, Phasen- und Frequenzänderungen, Phasenumkehr, Schwebungen usw. Die Beispiele werden im Zusammenhang mit den Eigenschaften des Verfahrens ausführlich diskutiert und dienen dem Studium der Analysiermethode, während weitere Anwendungen der Methode auch im Zusammenhang mit interessanten Problemen des Hörens einer späteren Arbeit vorbehalten sind.

LIPPERT

ARTHUR F. DEMING, **Propeller Rotation Noise Due to Torque and Thrust.** (Das Luftschrauben-Rotationsgeräusch, erzeugt durch Drehmoment und Schub). (Civil Aeronautics Authority, Washington, D. C.) Erschienen: J. Acous. Soc. Am., Vol. 12, July 1940. S. 173.

Nach den Untersuchungen des Verfassers wird das sog. Rotationsgeräusch durch eine Druckwelle verursacht, welche das Schraubenblatt einhüllt und mit ihm umläuft. Man kann sie sich erzeugt denken durch drei voneinander unabhängige Anteile, nämlich dem Drehmoment, dem Schub und der Blattd cke. Die bisher bekannt gewordenen Propellertheorien (GUTIN, Z. Phys. UdSSR. 9) geben bezüglich der Absolutwerte der räumlichen Verteilung und der Phasen der Harmonischen nur für den Grundton

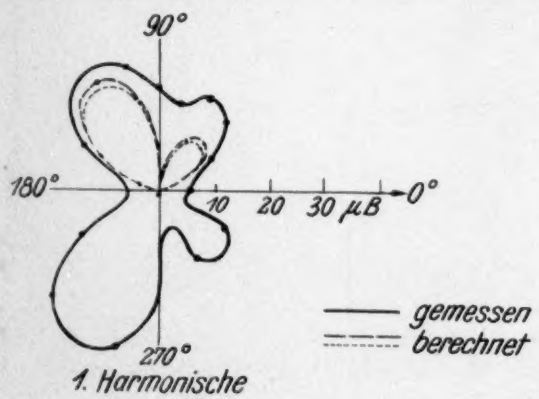

Abb. 1

eine befriedigende Übereinstimmung mit den Versuchen, wogegen sie bei höheren Ordnungen versagen. Der Verfasser erweitert zunächst die Theorie von GUTIN, nach welcher das Luftschraubengeräusch allein vom Drehmoment und Schub herrührt, indem er die GUTINschen Ergebnisse für den strahlenden Kreisring auf die Kreisfläche überträgt. Zu diesem Zweck werden analytisch einfache Annahmen für die radiale Schub- und Drehmomentverteilung gemacht.

Die an einer 2-Blatt-Schraube natürlicher Größe durchgeführten Messungen sind absolut verglichen mit den theoretischen Werten in Abb. 1—4 dargestellt. Hier beziehen sich die gestrichelten Werte auf das GUTINsche Ergebnis und die punktierten Werte auf die vom Verfasser gegebene Erweiterung.

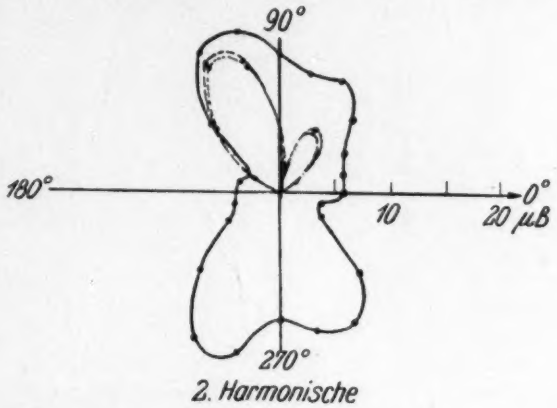

Abb. 2

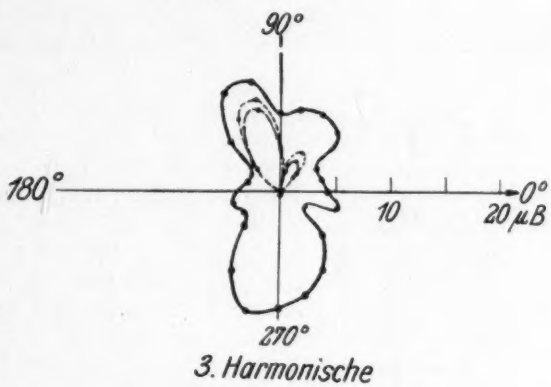

Abb. 3

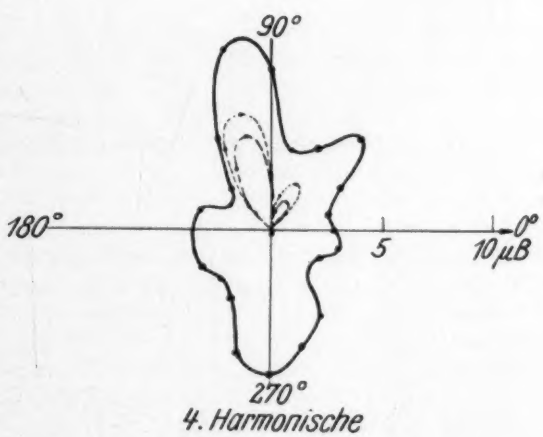

Abb. 4

Ausführlich wird der Einfluß der Blattzahl behandelt und Kurven angegeben, denen man den Schalldruck, abhängig von Blattzahl und Ordnung der Harmonischen bei Umfangsgeschwindigkeiten bis zum 0,9fachen der Schallgeschwindigkeit, entnehmen kann.

Die aus den Richtkurven ermittelten Schallleistungen der ersten vier Harmonischen ergeben

für den Versuch	aus der Theorie
$P_1 = 18{,}2$ Watt	$P_1 = 7{,}4$ Watt
$P_2 = 6{,}3$ „	$P_2 = 2{,}6$ „
$P_3 = 2{,}9$ „	$P_3 = 1{,}0$ „
$P_4 = 1{,}2$ „	$P_4 = 0{,}35$ „

Bei den höheren Harmonischen ist nach Ansicht des Verfassers der Einfluß der Blattdicke von Bedeutung. Daher läßt sich eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten erreichen, wenn man die Wurzel aus der Summe der Schalldruckquadrate für den Schub, Drehmoment- und den Dickeneffekt angibt.

Zur Frage des Auftretens endlicher Amplituden im Propellerschall dicht am Schraubenblatt wird bemerkt, daß solche im allgemeinen nicht beobachtet werden konnten. Es kann jedoch angenommen werden, daß die Verhältnisse sich ändern bei Harmonischen, deren Wellenlänge vergleichbar mit der Blattbreite ist. ERNSTHAUSEN

W. C. BEASLEY, **Eigenschaften und Verteilung des Hörverlustes bei der Bevölkerung der Vereinigten Staaten.** J. Acous. Soc. Am. 12 (1940), S. 114.

Der Betrag und die Verteilung des Hörverlustes bei der Bevölkerung ist für den Akustiker und alle diejenigen von besonderem Interesse, die auf dem Gebiet der Sprachübertragung arbeiten. Da für eine Bestimmung des Hörverlustes bei der ganzen Bevölkerung die normalen Methoden nicht in Frage kommen konnten, wurde die Erforschung im Rahmen einer vom „United States Public Health Service" unternommenen Statistik des nationalen Gesundheitsstandes durchgeführt. Meistens wurden Haushaltsvorstände unterwiesen, die jedes Haushaltmitglied auf Grund von Antworten auf eine bestimmte Reihe von Fragen in eine der folgenden fünf Gruppen einteilten:

1. Teilweise Schwerhörigkeit, Grad 1: Schwierigkeiten bei Sprache in Kirche, Theater und Gruppenunterhaltung, Hörvermögen ohne künstliche Mittel bei geringer Entfernung.
2. Teilweise Schwerhörigkeit, Grad 2: Schwierigkeiten bei Unterhaltung in geringer Entfernung, Hörvermögen über Telefon und bei lauter Sprache.
3. Teilweise Schwerhörigkeit, Grad 3: Schwierigkeiten bei Telefon und großer Lautstärke, Hörvermögen mittels Hörhilfen: Hörrohr oder andere Mittel zur Verstärkung.
4. Totale Schwerhörigkeit: Kein Hörvermögen, aber Hördefekt erst nach Erlernen der Sprache.
5. Taubstummheit: Taub geboren oder Taubheit vor Erlernen der Sprache erworben.

Alle Personen, die nicht in eine dieser Gruppen eingeteilt werden konnten, wurden als normalhörend bezeichnet.

Auf diese Weise wurden über 2,5 Millionen Versuchspersonen (48% männlich, 52% weiblich) geprüft.

In 12 Städten wurden 17 Kliniken eingerichtet und Versuchspersonen, die durch die Statistik erfaßt worden waren, zu einer Hals-, Nasen- und Ohrenuntersuchung und Audiogrammaufnahme eingeladen. Die Hörverlustmessungen wurden an über der Hälfte der 9300 Versuchspersonen in schallgedämpften Räumen gleicher Konstruktion bei 8 Tönen für Luftleitung und 6 Tönen für Knochenleitung mit dem Western 2 A-Audiometer für beide Ohren erhalten. Durch eine klinische Untersuchung unabhängig von der audiometrischen Prüfung wurden die Versuchspersonen nochmals ähnlich wie bei der Statistik eingeteilt.

Die Schwerhörigkeitsgrade 1 und 2 treten bei der „gesellschaftlichen" Untersuchung im Durchschnitt bei größeren Hörverlusten auf als bei der „klinischen" Untersuchung (vgl. Tab. 1), woraus geschlossen wird, daß sich ein Hörverlust bei der

Tabelle 1

Mittlerer Hörverlust db zwischen 1000 und 2000 Hz

Grad	gesellschaftliche Prüfung	klinische Untersuchung
normal	7	— 0,3
1	47	24
2	55	45
3	68	67
total	89	88

Umgangssprache erst bei größeren Beträgen bemerkbar macht als bei der klinischen Untersuchung, wo die Versuchsperson selbst das Urteil abgibt. Aus der Charakteristik des Knochenleitungshörverlustes schließt der Verfasser auf ein Vorherrschen der Nervenschwerhörigkeit. Die durch die Statistik erhaltenen Ergebnisse werden nach Geschlecht und Alter geordnet. Im Anschluß daran wird noch die jährliche Zunahme des Anteils der schwerhörigen Bevölkerung aus der Einteilung in Jahresklassen absolut und im Vergleich zu der minimalen Zunahme der Jahresklasse 15—24 angegeben. Schließlich wird auch noch eine Abhängigkeit der Gehörverschlechterung von der Einkommenslage gefunden; z. B. liegt die jährliche Zunahme des Anteils der schwerhörigen Bevölkerung in der Jahresklasse 45—64 bei Einkommen unter 1000 $ etwa 110% über derjenigen bei Einkommen über 3000 $. RICHARD BIERL

Akustisches Schrifttum des Jahres 1940

Bearbeitet von K. Patermann

Zeitschriften des Jahres 1940

Einteilung:

1. Allgemeines und Gesamtdarstellungen.
2. Physikalische Akustik.
3. Siebketten (elektrische und akustische).
4. Meßtechnik.
5. Raum- und Bauakustik.
6. Schallübertragung und Rundfunk.
7. Schallübertragung auf Leitungen.
8. Mikrophone.
9. Membranen und Platten.
10. Telephone.
11. Lautsprecher und Übertragungsanlagen.
12. Tonfilmtechnik.
13. Magnettontechnik.
14. Schallplattentechnik.
15. Akustik in der Wehrtechnik.
16. Echolote (Wasserschall).
17. Lärm- und Erschütterungsabwehr.
18. Medizinische und physiologische Akustik (Gehör).
19. Sprache.
20. Musikalische Akustik.
21. Elektrische Musik.
22. Piezelektrische Kristalle.
23. Ultraschall.

1. Allgemeines und Gesamtdarstellungen

Sound. E. G. Richardson. Rep. Progr. Phys. **6** (1940), S. 238—269.

Sound ideas. S. G. Taylor. Commun. **20** (1940), Nr. 4, S. 17—18, 36.

Electroacustics 1939. Proc. Inst. Radio Engrs. **28** (1940), Nr. 3, S. 99—102.

Entwicklungsrichtungen der Elektroakustik. H. Benecke. Dtsch. Techn. **8** (1940), Nr. 4, S. 127—129.

Acustica applicata et elettroacustica. Alta Frequ. **9** (1940), Nr. 2, S. 121—122.

Über die biologische Bedeutung der Lautäußerungen einiger Insekten. U. Gerhardt. Forsch. u. Fortschr. **16** (1940), Nr. 25/26, S. 291—292.

Gesang, Gehör und Musikalität der Vögel. S. Knecht. Naturwiss. **28** (1940), Nr. 42, S. 658—663.

Bibliography on phonetics. S. N. Trevino. Amer. Speech Febr. 1940, S. 99—102.

Recent work in experimental phonetics. E. G. Richardson. Nature, Lond. **145** (1940), Nr. 3683, S. 841—843.

2. Physikalische Akustik

The velocity of sound in air at temperatures below 0° C. A. E. Bate. J. sci. Instrum. **17** (1940), Nr. 3, S. 68 bis 69.

Schallfortpflanzung und Höraufgaben bei Schallalarmen. C. Zwikker. Polyt. Weeklb. (holl.) **34** (1940), S. 177 bis 179.

Über die Schallausbreitung im Freien und ihre Abhängigkeit von den Wetterbedingungen. H. Sieg. Elektr. Nachr.-Techn. **17** (1940), Nr. 9, S. 193—208.

Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Konzentration in einem dipol-dipollosen Flüssigkeitsgemisch. K. Sacher. Phys. Z. **41** (1940), Nr. 15, S. 360—362.

Energetische Betrachtungen zum Schallstrahlungsdruck. F. Bopp. Ann. Phys. (5) **38** (1940), Nr. 6, S. 495—500.

Zur Frage des Schallstrahlungsdruckes. G. Richter. Z. Phys. **115** (1940), Nr. 3/4, S. 97—108.

Der Schallstrahlungsdruck in Flüssigkeiten und Gasen im Zusammenhang mit der Zustandsgleichung. G. Hertz. Verh. Dtsch. Phys. Ges. **21** (1940), Nr. 2, S. 38; Z. techn. Phys. **21** (1940), S. 298—301.

Zur Diskussion über den Schallstrahlungsdruck. G. Schaefer. Z. Phys. **115** (1940), Nr. 3/4, S. 109—110.

Attenuation of sound in ducts of conmercial size. R. B. Steffens u. W. T. Young. Heatin-Piping **12** (1940), S. 567—572.

Über den Mechanismus der Entstehung des Phasenunterschiedes zwischen Druck- und Dichtewellen bei der molekularen Schallabsorption in Gasen und über eine einfache Ableitung der Absorptions- und der Dispersionsformel. O. Nomoto. Proc. physico. math. Soc. Japan III **22** (1940), S. 77—90.

The attenuation of sound in tubes. R. Rogers. J. Acous. Soc. Am. **11** (1940), Nr. 4, S. 480—484.

Attenuation of sound in tubes. R. D. Fay. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 1, S. 62—67.

On the maximum possible reinforcing of sound in an enclosure. G. M. Suharevsky. C. R. (Doklady) Acad. Sci. URSS. **26** (1940), Nr. 9, S. 892—899.

Zur Schallstärke des von schnell bewegten Profilen erzeugten Schalles. W. Holle u. E. Lübcke. Luftfahrtforsch. **17** (1940), Nr. 2, S. 56—58.

Sound absorption in light gases. A. van Itterbeck u. P. Mariens. Physica **7** (1940), Nr. 10, S. 938—944.

Absorption hörbaren Schalles in Luft und ihre Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur. H. Knötzel. Akust. Z. **5** (1940), Nr. 5, S. 245—256.

The absorption of sound in CO_2, N_2O, COS, and in CS_2, containing added impurities. V. O. Knudsen u. E. Fricke. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 2, S. 255 bis 259.

Ein Nomogramm zur Ermittlung des Schallabsorptionskoeffizienten in Luft. H. O. Kneser. Akust. Z. **5** (1940), Nr. 5, S. 256—257.

Ein elektrodynamischer Abtaster zur Untersuchung mechanischer Schwingungen. J. Severs. Philips techn. Rdsch. **5** (1940), Nr. 8, S. 237—244.

Square wave harmonics. D. L. Herr. Electronics, N. Y. **13** (1940), Nr. 5, S. 34.

Recording and reproducing square waves. D. Canady. J. Soc. Mot. Pict. Engrs. **34** (1940), Nr. 4, S. 446.

An electrical method for compounding sine functions. L. R. Maxwell. Rev. sci. Instrum. **11** (1940), S. 47 bis 54.

Zur Konstruktion des Vektordiagramms der gedämpften Schwingung. S. Reisch. Z. techn. Phys. **21** (1940), Nr. 8, S. 176—177.

Analogie elettrico-meccaniche. P. G. Bordoni. Alta Frequ. **9** (1940), Nr. 3, S. 133—161.

Bemerkungen zur Berechnung des Molekülradius aus Molvolumen und Schallgeschwindigkeit. W. Schaaffs. Z. Phys. **115** (1940), Nr. 1/2, S. 69—76.

On the resultant intensity of a number of vibrations whose phase are at random. M. Nakagami & M. Ohno. Nippon electr. Comm. Engng. (1940), Nr. 19, S. 129 bis 137.

Über die Möglichkeit einer Sicht durch undurchsichtige Medien auf Grund von Schall-Abbildungen. R. Pohlmann. Forsch. Fortschr. **16** (1940), Nr. 22/23, S. 248 bis 250.

Alteration in the liquid structure of electrolytes as indicated by acoustic waves. V. B. Corey & G. W. Stewart. J. Acous. Soc. Am. **11** (1940), Nr. 3, S. 378.

On the maximum possible reinforcing of sound under outdoor conditions. G. M. Suharevsky. C. R. (Doklady) Acad. Sci. URSS **26** (1940), Nr. 9, S. 885—891.

Concerning „Physics of flames and explosions of gases." W. T. David. J. appl. Phys. **11** (1940), Nr. 2, S. 157 bis 158.

Assorbimento del suono mediante sistemi risonanti. A. Gigli. Alta Frequ. **9** (1940), Nr. 12, S. 717—744.

Über das Ersatzschema des Kugelknalls. L. Cremer. Akust. Z. **5** (1940), Nr. 1, S. 46—50.

Experimentelle Untersuchung eines quasiharmonischen Schwingers. H. Neusinger. Akust. Z. **5** (1940), Nr. 1, S. 11—26.

Eine Methode zur Erzeugung extrem starker stehender Schallwellen in Luft. H. Oberst. Akust. Z. **5** (1940), Nr. 1, S. 27—38.

Der Dopplereffekt an Wasserwellen. Z. Guylai. Phys. Z. **41** (1940), Nr. 1, S. 26—27.

On the theory of acoustic feed-back in sound-reinforcing systems. G. M. Suharevsky. C. R. (Doklady) Acad. Sci. URSS **26** (1940), Nr. 5, S. 430—435.

On the theory of fluctuations in the decay of sound. R. C. Jones. J. Acous. Soc. Am. **11** (1940), Nr. 3, S. 324—332.

Zur akustischen Brechung und Totalreflexion (Versuche mit Gasen bei kontinuierlichem Übergang der Grenzschicht). O. v. Schmidt u. A. Kling. Phys. Z. **41** (1940), Nr. 17/18, S. 407—409.

Uso di circuiti elettrici equivalenti per l'analisi sperimentale di sistemi elettroacustici. Frank Massa. Alta Frequ. **9** (1940), Nr. 7, S. 388—392.

Untersuchung über ein Tontrennungsverfahren. H. Bachstrom u. H. Hafstrom. Photogr. Ind. **37** (1939), Nr. 46, S. 1142—1143, Nr. 47, S. 1156—1158.

The radiation of the acoustic air-jet generator derived from direct observation of the amplitude of the aerial vibrations in the oscillator. J. Hartmann & F. Lazarus. Phil. Mag. (7) **29** (1940), Nr. 193, S. 140—147. Nature Lond. **145** (1940), Nr. 3681, S. 787; **146** (1940), Nr. 3706, S. 623—624.

Shock waves in air and characteristics of instruments for their measurement. L. Thompson. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 1, S. 198—204.

Sound pressure on spheres. F. E. Fox. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 1, S. 147—149.

The thermoregeneration of sound. K. Teodorchik. J. techn. Phys. (russ.) **10** (1940), Nr. 11, S. 914—917. J. Phys. (Moskau) **2** (1940), Nr. 6, S. 437—440.

Zur Theorie der akustischen Doppelbrechung von kolloidalen Lösungen. S. Oka. Z. Phys. **116** (1940), Nr. 9/10, S. 632—651.

Wirkungsweise und Anwendung des Multivibrators. R. Theile. Funk (1940), Nr. 22, S. 337—342.

Beat-frequency crystal oscillator. J. Koga & W. Yamamoto. Electrotechn. J., Tokyo **4** (1940), Nr. 6, S. 134 bis 137.

Bridge oscillator. Bell Labor. Rec. **18** (1940), Nr. 5, S. 144a.

Teilung und Vervielfachung von Frequenzen. Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. **31** (1940), Nr. 2, S. 41—43.

High-efficiency frequency doublers. J. E. Shepherd. Proc. Inst. Radio Engrs. **28** (1940), Nr. 5, S. 252.

Was versteht man unter akustischer Atmosphäre und welche Gesichtspunkte sind für ihre Übertragung von Bedeutung? R. Merten. Dt. Musikkultur **5** (1940), Nr. 3, S. 64—73.

Observations on edge tones. J. M. A. Lenihan & E. G. Richardson. Phil. Mag. (7) **29** (1940), Nr. 195, S. 400 bis 406.

Transmission of sound through thin plates. F. H. Sanders. Canad. J. Res (A) **17** (1939), Nr. 9, S. 179—193.

Über stationäre Strömungen im Kundtschen Rohr. K. Schuster u. W. Matz. Akust. Z. **5** (1940), Nr. 6, S. 349—352.

L'inertie des régimes dans les fluides oscillants. Z. Carrière. J. Phys. Radium (8) **1** (1940), S. 68—73.

Das thermoregenerierte Rohr als Schallempfänger. K. F. Theodortschik & K. Welezhanin. J. Phys. USSR **3** (1940), Nr. 1, S. 29—30. J. techn. Phys. (russ.) **10** (1940), S. 1138—1139.

Entgasung von Aluminium durch Schall und Ultraschall. Th. Rummel, W. Esmarch & K. Beuther. Metallwirtsch. **19** (1940), Nr. 46, S. 1029—1033.

Die Wirkung intensiven Schalls auf Metallschmelzen. G. Schmidt u. A. Roll. Z. Elektrochem. **46** (1940), Nr. 12, S. 653—657.

Den akustiske Luftstraalegenerator. Jul. Hartmann. Fysisk Tidsskr. **38** (1940), Nr. 3/4, S. 97—113. Phil. Mag. (7) **29** (1940), S. 140—147.

A physical analysis of distortion produced by the nonlinearity of the medium. L. J. Black. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 2, S. 266—267.

Sound absorption in rectangular ducts. L. L. Beranek. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 2, S. 228—231.

A tuning fork maintained by photocell. Cambridge Instrument Comp. J. sci. Instrum. **17** (1940), S. 72.

The absorption of sound in five triatomic gases. E. F. Fricke. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 2, S. 245—254.

Transmission of sound through parallel conduits. L. W. Labaw. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), Nr. 2, S. 232 bis 240.

Akustisch-elektrochemische Erscheinungen. III. Ursachen der Schallaufnahme durch polarisierte Elektroden. IV. Charakteristik der Schallaufnahme durch halbdurchlässige Membranen. V. Charakteristik der Schallaufnahme durch Platinelektroden und mit Quecksilber bedeckte Kolloidiummembranen. L. W. Nihitin. J. Chim. gén. (russ.) (72) **10** (1940), S. 97 bis 101, 102—111, 636—640.

Theorie der Schalldispersion bei Vorhandensein mehrerer Normalschwingungen. Klaus Schufer. Z. phys. Chem. Abt. B **46** (1940), S. 212—228.

Elettrodiapason automatico. S. Baglioni e A. Manfredi. Ric. sci. **11** (1940), S. 526—528.

Calculation of acoustic waves with irregular boundaries. R. H. Bolt. Phys. Rev. **57** (1940), Nr. 11, S. 1057.

Ein Tongenerator. Elektrotekn. I., Oslo **53** (1940), Nr. 25, S. 292—293.

Hörschall und Ultraschall als Hilfsmittel der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung in der Herstellung von Kälteapparaturen. A. Kufferath. Kälte **16** (1940), Nr. 10, S. 73—74, Nr. 11, S. 83—84.

Sound velocity and inter-molecular forces. M. Rama Rao. Current Science **8** (1939), Nr. 11, S. 510—511.

On experimental investigation of acoustic feed-back in a closed room. G. M. Suharevsky. C. R. (Doklady) Acad. Sci. USSR **26** (1940), S. 638—643.

Calculation of the radiation properties of hollow pipes and horns. L. J. Chu. J. appl. Physics **11** (1940), Nr. 9, S. 603—610.

Über die Möglichkeit einer akustischen Abbildung in Analogie zur optischen. R. Pohlmann. Verh. Dtsch. Phys. Ges. (3) **21** (1940), Nr. 2, S. 15—17.

The method of symmetrical components applied to harmonic analysis. L. A. Pipes. Phil. Mag. (7) **29** (1940), Nr. 192, S. 66—74.

Sur la propagation du son dans l'atmosphère et le temps de parcours de l'onde sonore. S. Tchibisoff. Bull. Acad. Sci. URSS, Sér. Géogr. et Géophys. 1940, Nr. 1, S. 38—118 (russ.).

Vibration source of variable frequency for Melde's experiment. P. J. Wold and F. J. Studer. Amer. J. Phys. **8** (1940), S. 165—167.

Propagation of sound in a homogeneous atmosphere. Y. Rocard. Rev. Sci., Paris **78** (1940), S. 209—211.

The velocity of sound. R. C. Colwell, A. W. Friend & L. H. Gibson. J. Franklin Inst. **230** (1940), Nr. 6, S. 749—754.

Some acoustical source-observer problems. S. W. Redfearn. Phil. Mag. (7) **30** (1940), Nr. 200, S. 223—236.

Some notes on end-corrections. L. C. Tyte. Phil. Mag. (7) **30** (1940), S. 173—184.

Absorption of sound in carbon dioxide. Robert W. Leonard. J. Acous. Soc. Am. **12** (1940), S. 241—244; Phys. Rev. (2) **57** (1940), Nr. 3, S. 253.

Relation between velocity of sound in liquids and molecular volume. M. R. Rao. Indian J. Phys. **14** (1940), S. 109—116.

Visual method for demonstrating refraction of sound. H. Kouglak & C. C. Kruse. Amer. J. Phys. **8** (1940), S. 260.

An investigation into centrifugal governor vibration. G. R. Allan. J. Inst. Mech. Engrs. März 1940, S. 60—62.

Quantitative laboratory demonstrations in sound. W. R. Wright. Amer. J. Phys. **8** (1940), Nr. 4, S. 255—258.

Attenuation of sound in ducts of commercial size. R. B. Steffens & W. T. Young. Heat. Pip. Air Condit. **12** (1940), S. 567—572.

Ein neuer Weg der Schallstrahlen in der Atmosphäre. O. v. Schmidt. Dtsch. Luftwacht. Luftwissen **7** (1940), S. 382—385.

Schallabsorptions- und Dispersionsmessungen an CH_4, COS und ihren Mischungen mit Zusatzgasen. A. Eucken u. S. Aybar. Z. phys. Chem. Abt. B **46** (1940), S. 195—211.

Measurement of solid friction of plastics. A. Gemant. J. appl. Physics **11** (1940), S. 647—653.

Study on the resultant amplitude of many vibrations whose phases and amplitudes are at random. M. Nakagami. Nippon electr. Comm. Engng. 1940, Nr. 22, S. 69—92.

Schulze, Reinhard. Über Hörschallgeschwindigkeit und -dispersion in Chlor. Dissertation Marburg 1939. (Vgl. Ann. Phys. (5) **34**, Nr. 1.)

Otting, Gerh. Der quadratische Dopplereffekt. Dissertation München 1940. S. 681—687.

3. Siebketten (elektrische und akustische)

Filter design charts. John Borst. Electronics, N. Y. **13** (1940), Nr. 8, S. 35—36, Nr. 10, S. 39—40, Nr. 11, S. 41—42.

Regelbare Quarzfilter. H. Pitsch. Funk 1940, Nr. 23, S. 362—363.

Regelbare Quarzfilter. R. Schumann. Funkschau **13** (1940), Nr. 12, S. 188.

Einheitliche Kurventafeln zur Berechnung des Wellenübertragungsmaßes von Bandpaß-Siebkettengliedern. R. Feldtkeller. Telegr.-, Fernspr.-, Funk- u. Fernseh-Techn. **29** (1940), Nr. 7, S. 201—206.

Design of ladder-type filter by means of open and short circuit reactances. A. Matsumoto. Nippon electr. Comm. Engng. 1940, Nr. 19, S. 138.

Synthesis of filter networks by ladder type structure. A. Matsumoto. Nippon electr. Comm. Engng. 1940, Nr. 21, S. 42—45.

Die Grundlagen der Siebschaltungstheorien und ihre Anwendungen. H. Epheser u. H. Glubrecht. Elektr. Nachr.-Techn. **17** (1940), Nr. 8, S. 169—192.

Berechnung einer Siebdrossel des Netzanschlußteils. H. Pitsch. Funktechn. Mh. 1940, Nr. 10, S. 153—156.

Das Abgleichen von Bandfiltern. H. Pitsch. Funktechn. Mh. 1940, Nr. 9, S. 132—133.

A resistance compensated band-stop filter. H. Stanesby. Post Office electr. Engrs. J. **33** (1940), Nr. 2, S. 82—87.

Impedance networks including filter synthesis, networks with constant input impedance, and distortion-correcting networks. R. S. Rivlin. Rep. Progr. Phys., Phys. Soc. **6** (1940), S. 389—402.

Simple treatment of band-pass filters. J. Greig. Wireless Engr. **17** (1940), Nr. 198, S. 110.

Concentric line resonator filter circuits. Electronics & Television, Lond. **13** (1940), Nr. 147, S. 209—211.

Die Kerngröße von Filterspulen für gegebenen Frequenzbereich. W. Hornauer. ETZ **61** (1940), Nr. 47, S. 1053—1054.

Transversal filters. H. E. Kallmann. Proc. Inst. Radio Engrs. **28** (1940), Nr. 6, S. 302—310.

Berechnung von Brückenfiltern. R. Steffenhagen. Funktechn. Mh. 1940, Nr. 12, S. 182—192.

New voice-frequency electrical delay network. H. M. Thomson. Bell Labor. Rec. **19** (1940), Nr. 1, S. 15—18.

Über die günstigste Form der Übertragungskurven dreikreisiger Rundfunksiebschaltungen. J. Gensel. Telegr.-, Fernspr.-, Funk- u. Fernseh-Techn. **29** (1940), Nr. 6, S. 159—164.

Serienkreis, gekoppelte Kreise und Bandfilter. W. de Gruyter. Bull. schweiz. electrotechn. Ver. **31** (1940), Nr. 19, S. 416—429.